Journal of Korean Society on Water Environment, Vol. 36, No. 1, pp. 48-54 (January, 2020)
pISSN 2289-0971 eISSN 2289-098X https://doi.org/10.15681/KSWE.2020.36.1.48

비수용성 용매를 이용한 탈염화 가능한가?: 적용 가능한 용매선정 기법 제안

최오경[1a] · 서준호[1b] · 김경수[1c] · 김두일[2] · 이재우[1,†]

[1]고려대학교 환경시스템공학과 · [2]단국대학교 토목환경공학과

Can Non-aqueous Solvent Desalinate?: Suggestion of the Screening Protocol for Selection of Potential Solvents

Oh Kyung Choi[1a] • Jun Ho Seo[1b] • Gyeong Soo Kim[1c] • Dooil Kim[2] • Jae Woo Lee[1,†]

[1]Department of Environmental Engineering, Korea University
[2]Department of Civil and Environmental Engineering, Dankook University
(Received 16 December 2019, Revised 29 January 2020, Accepted 30 January 2020)

Abstract

This paper presents a screening protocol for the selection of solvents available for the solvent extraction desalination process. The desalination solvents hypothetically and theoretically require the capability of (1) Forming hydrogen bonds with water, (2) Absorbing some water molecules into its non-polar solvent layer, (3) Changing solubility for water-solvent separation, and (4) Rejecting salt ions during absorption. Similar to carboxylic acids, amine solvents are solvent chemicals applicable for desalination. The key parameter for selecting the potential solvent was the octanol-water partitioning coefficient (Kow) of which preferable value for desalination was in the range of 1-3. Six of the 30 amine solvents can absorb water and have a variable, i.e., temperature swing solubility with water molecule for water-solvent separation. Also, the hydrogen bonding interaction between solvent and water must be stronger than the ion-dipole interaction between water and salt, which means that the salt ions must be broken from the water and only water molecules absorbed for the desalination. In the final step, three solvents were selected as desalination solvents to remove salt ions and recover water. The water recovery of these three solvents were 15.4 %, 2.8 %, 10.5 %, and salt rejection were 76 %, 98 %, 95 %, respectively. This study suggests a new screening protocol comprising the theoretical and experimental approaches for the selection of solvents for the desalination method which is a new and challenges the desalination process in the future.

Key words : Amine, Hyper-saline wastewater treatment, Screening protocol, Solvent extraction desalination

[1a] 연구교수(Research Professor), ogangogang7@korea.ac.kr, https://orcid.org/0000-0003-3539-9069
[1b] 석사과정(Master Student), tinky1244@korea.ac.kr, https://orcid.org/0000-0002-9455-2636
[1c] 연구원(Researcher), withkim25@korea.ac.kr, https://orcid.org/0000-0002-6456-7394
[2] 교수(Professor), dikim21@dankook.ac.kr, https://orcid.org/0000-0003-3363-626X
[1,†] Corresponding author, 교수(Professor), jaewoo@korea.ac.kr, https://orcid.org/0000-0002-4376-476X

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. Introduction

해수뿐만 아니라 화학 산업 공정, 셰일가스 채굴 등 다양한 산업 공정에서는 염 농도가 높은 다량의 폐수가 발생하게 되며(Coday and Cath, 2014; Igunnu and Chen, 2012), 폐수 내에 존재하는 고농도의 염 이온(Na^+, Mg^{2+}, Cl^- 등)은 생물학적으로 처리가 불가능하여 대부분 물리・화학적인 방법을 이용한 탈염화 과정을 거친 후 처리된다(Choi et al., 2012). 이러한 탈염화 방법에는 열을 이용하는 증발법과 분리막을 이용하는 막 분리 공정이 널리 이용되고 있으나 증발법은 고염도 폐수를 기체로 상변화 시키기 위한 물의 증발잠열(539 kJ/kg)을 포함하는 높은 열에너지가 요구되고(Al-Qaraghuli and Kazmerski, 2012), 역삼투(Reverse Osmosis, RO)로 대표되는 막 분리 공정 또한 삼투압을 역방향으로 유도하기 위한 높은 압력을 위해 막대한 전기 에너지가 소모되는 단점이 있다(Subramani et al., 2014). 따라서 에너지 소모를 줄이고 지속가능한 탈염 공정의 개발을 위해 전기투석, 용매추출 등 다양한 시도가 이루어지고 있다(Bajpayee et al., 2011; Chaalal and Hossain, 2015; Kwak et al., 2016).

이 중에서 용매추출 탈염화 기술은 온도에 따라 가변적인 물 용해도를 가지는 특수한 용매를 이용하여 염수로부터 순수한 물을 분리하는 기술로서, 1960년대 2차 및 3차 아민 계열의 용매를 사용하여 그 가능성이 처음 보고된 바 있다(Davison et al., 1960). 용매추출 탈염화 기술은 높은 열에너지와 압력의 요구가 없는 저에너지 공정으로 잠재력이 있었지만, 초기 용매추출 탈염화 연구에서는 현상적인 실험 결과로만 그 가능성이 증명되었을 뿐 용매가 염수로부터 염 이온을 배제하고 순수한 물 분자를 선택적으로 흡수하는 메커니즘에 대한 규명이 명확하게 이루어지지 못해 상용 기술로 발전하기에는 한계가 있었다. 최근 Bajpayee et al. (2011)은 Carboxyl group (C=O)을 포함하는 지방산 계열인 Octanoic acid (OA), Decanoic acid (DA)가 아민 계열 용매와 유사하게 염수로부터 물을 분리시킬 수 있는 것을 발견하였으며, 이후 다양한 실험적, 수학적 이론을 바탕으로 용매와 물 분자간의 수소 결합(Hydrogen bonding)을 통해 용매추출 탈염화 공정이 유도되고(Luo et al., 2011), 염 이온과 용매 사이의 용매화 자유에너지(Solvation free energy) 차이에 의해 염수로부터 염 이온이 제거되는 것이 증명되었다(Rish et al., 2014). 또한 최근의 연구는 물 회수 특성이 용매의 구조적 특징 (즉, 구조의 길이 및 모양)에 따라 달라질 수 있음을 증명하였다(Chandran and Shah, 2018, Choi et al., 2019). 하지만 용매추출 탈염화 공정을 상용 기술로 발전시키기 위해서는 기존 용매들의 낮은 물 회수율(3 % 이내)을 극복할 수 있는 고효율 용매를 발굴하고 이에 맞는 탈염화 공정을 설계하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 용매추출 탈염화 기술에 적용 가능한 고효율 용매를 발굴하기 위하여 다양한 분자 구조를 갖는 아민 계열의 비수용성 용매 후보들의 물리・화학적 특성을 비교하여 탈염화 잠재력이 있는 용매 후보들을 선정할 수 있는 이론적 분류 체계를 구축하고자 하였다. 또한 이러한 이론적 분류 단계를 통해 최종 선정된 용매 후보들을 대상으로 회분식 용매추출 탈염화 실험을 통해 고염도 폐수의 용매추출 탈염화 기술 적용 가능성을 평가하고자 하였다.

2. Materials and Methods

2.1. 탈염화 용매 발굴을 위한 이론적 선정 과정

용매추출 탈염화 공정 적용이 가능한 용매를 합리적으로 발굴하기 위해 이론적인 기작들을 바탕으로 다양한 용매 후보들 중에서 잠재력이 높은 용매들을 선정하기 위해 수립된 Screening Protocol을 Fig. 1에 제시하였다. 첫 번째 선별 단계는 탈염화 용매가 염수와 혼합되는 단계에서 물을 흡수하기 위해, 물과 수소결합이 가능한 음전위 원자인 질소(N), 산소(O), 불소(F)를 포함하고 있는지에 대한 여부가 포함된다(Robertson et al., 2017). 일반적으로 Amine, Glycerol ether 및 Amino-ethers 등의 물질들이 물과 완전히 혼화되지는 않지만 온도 조건에 따라 물에 대한 용해도 변화가 나타나며, 수소결합을 형성하는 특성을 갖는 강한 음전위 원자를 함유하는 용매로 알려져 있으며(Davison et al., 1960), 카르복실기(Carboxyl group)를 포함하는 지방산 계열의 용매들 또한 물과의 수소결합 형성이 가능하다(Bajpayee et al., 2011). 두 번째 선별 단계는 용매의 비극성도를 판단하는 단계이며, 이는 탈염화 공정에서 용매가 염수와의 혼화성이 너무 낮거나 높을 경우 염수 내 물과 용매의 결합이 일어나지 않거나 염수로부터 용매를 분리하는 것이 어려워지기 때문에 공정을 설계하는 과정에서 매우 중요한 역할을 하는 인자로 판단된다(McCalley, 2017). 용매의 극성도는 옥탄올과 물 사이의 분배 계수(Octanol-water partition coefficient, K_{ow})로 대표되며, K_{ow} 값이 1보다 작을 때 용매는 혼합 없이 대부분 수층에 위치하게 된다. 따라서 이 단계에서 선정되는 용매들은 K_{ow} 값을 기준으로 1 이상의 용매들로만 선별이 가능하다. 세 번째 단계는 용매와 물 분자 사이의 상호작용을 평가하는 단계이다. 용매추출 탈염화에서 물과 용매의 수소결합에 의한 흡수/분리 과정이 온도의 변화를 통해 이루어지기 때문에 용매에 따른 물성 파악이 매우 중요하다(Stephenson, 1993).

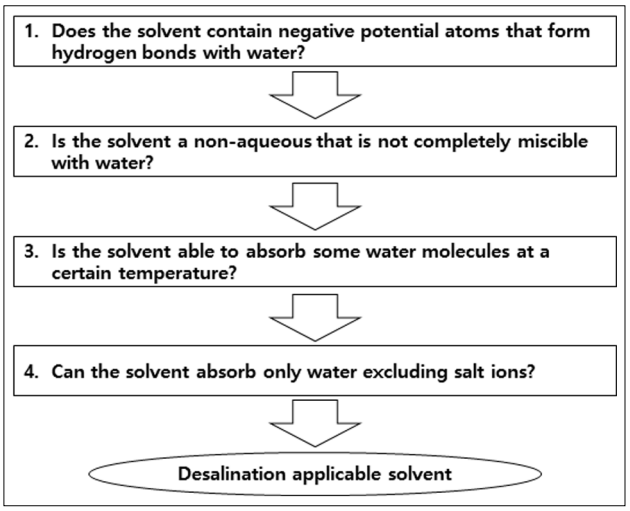

Fig. 1. Screening protocol for the desalination solvent selection.

2.2. 회분식 용매추출 탈염화 실험

이론적 과정을 통해 선정된 후보 용매들을 대상으로 탈염화 성능을 평가하기 위하여 회분식 용매추출 탈염화 실험을 수행하였다. 고염도 폐수의 용매추출 탈염화 실험은 0.5 M의 농도로 조제된 NaCl 수용액을 인공 염수로 사용하여 수행되었다. Fig. 2의 (a)단계에 도시한 바와 같이 준비된 인공염수 100 mL와 아민 계열의 비수용성 용매 100 mL을 비이커에 주입한 후 자석 교반기를 사용하여 두 용액이 완전히 혼합되도록 500 rpm으로 강하게 교반하였다. 교반 종료 후 용매와 인공염수는 Fig. 2의 (b)단계와 같이 극성 및 비중의 차이로 인해 빠르게 두 층으로 분리되며 이 때, 상층부에는 물 분자가 일부 흡수된 용매층이 위치하게 된다. 상층부의 용매를 염수로부터 조심스럽게 분리시킨 후 80 ℃에서 30분간 가열하면 Fig. 2의 (d)단계와 같이 용매의 용해도가 감소하며 용매에 흡수된 물이 용매 밖으로 배출된다. 용매로부터 배출된 물을 용매와 다시 섞이지 않게 조심히 회수하였으며, 최종 회수된 물로부터 물 회수율과 염 제거율을 평가하였다.

2.3. 분석 방법

염 농축수(Brine)와 처리수의 Cl^-와 Na^+의 농도는 Ion Chromatography (IC, ICS-900, Dionex)를 이용하여 분석하였으며, 상층부의 용매에 흡수된 수분 함량은 Karl-Fischer Analyser (KF-890, Metrohm)를 이용하여 측정하였다. 각 용매의 물 회수율과 염 제거율은 다음 식 (1)과 (2)에 따라 각각 계산하였다.

$$\text{물 회수율}(\%) = \frac{V_2}{V_1} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{염 제거율}(\%) = \left(1 - \frac{C_2}{C_1}\right) \times 100 \quad (2)$$

여기서, V_1과 V_2는 각각 주입된 인공염수와 최종 회수된 처리수의 부피 (L)이며, C_1은 주입된 인공염수의 염 이온 농도 (mg/L), C_2는 최종 회수된 처리수의 염 이온 농도 (mg/L)를 나타낸다.

3. Results and Discussion

3.1. 탈염화 용매 발굴을 위한 이론적 선정 단계

Screening protocol에 따른 첫 번째 선별을 위하여 기존 문헌에서 조사된 탈염화 용매들에 대해 온도 변화에 대한 용해도 변화를 비교하여 Table 1에 제시하였다. 일반적으로 카르복실기(carboxyl group)를 포함하는 용매는 온도가 증가함에

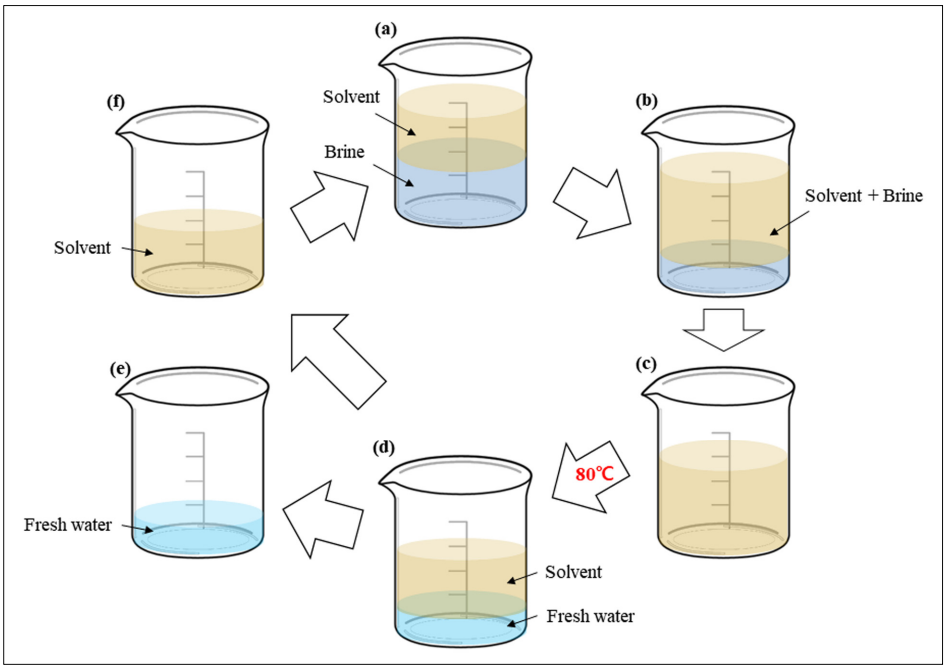

Fig. 2. Experimental process of the solvent extraction desalination.

Table 1. Solubility changes of the desalination solvents as a function of the temperature.

Name	Temp. range (℃)	Solubility in water (%)	Water separation efficiency (%)		Reference
			Pure water	Saline water	
Decanoic acid	34 → 80 ℃	3.8 % → 5.9 %	Max. 2.1 %	Max. 1.3 %	Sanap et al., 2015
Octanoic acid	26 → 60 ℃	2.7 % → 5.3 %	Max. 2.6 %	Max. 1.6 %	Bajpayee, 2012
N-Methylbutyl amine	43 → 90 ℃	69.1 % → 32.7 %	-	-	Davison et al., 1960
Diethylmethylamine	54 → 64 ℃	38.3 % → 25.4 %	Max. 7.0 %	-	Stephenson, 1993
N-Ethylpropylamine	49 → 79 ℃	52.4 % → 25.3 %	-	-	Stephenson, 1993

따라 용해도가 함께 증가하는 반면, 아민류의 경우 이와 반대되는 거동을 보이는 것으로 나타났다. 기존의 카르복실 산을 이용한 방법의 경우 염 제거율은 높으나, 일반적으로 물 회수율이 매우 낮다고 알려져 있다. 또한, 원수(해수 등)와 용매를 혼합하는 단계에서 승온(60～80 ℃) 해야 하기 때문에 필요한 열에너지가 높은 편이다. 이와 달리 아민류는 상온(혹은 저온)에서 물을 흡수한 뒤 흡수된 물과 용매를 고온에서 분리하기 때문에 열에너지 사용이 카르복실 산을 이용하는 경우보다 적을 수 있다(Alotaibi et al., 2017).

용매추출 탈염화 공정을 위해 요구되는 적정 용매는 물과 완전히 혼화되지 않지만 특정 온도 조건에서 일정량의 수분을 흡수할 수 있는 가변적인 용해성(Swing Solubility)을 갖는 비수용성 용매여야 한다. 따라서 탈염화 용매는 일반적으로 높은 K_{ow} 값을 가지는 것이 유리하다. 하지만, 높은 비극성도는 물 분자에 대한 높은 반발력을 가짐을 의미하며, 물 분자와 수소결합이 발생할 확률이 감소함을 의미하기 때문에 탈염화 용매로 적합한 용매의 K_{ow} 값은 비극성을 유지하는 범위 내에서 꽤 낮은 K_{ow} 값을 가져야 한다. 최종적으로 이론적 용매 선정의 마지막 단계에서 용매와 염 이온 사이의 상호작용과 관련한 특성이 평가된다. 염(소금)이 물에 용해될 때, 물 분자는 Na-Cl의 이온결합을 끊고 각각 반대 전하인 산소(O)와 수소(H)이온으로 이온-쌍극자 결합(Ion-Dipole Interaction)을 유도하게 된다. 용매와 물의 수소 결합력이 물과 이온의 쌍극자 결합력보다 더 클 때 용매는 염을 배제하고 물 분자를 용매층으로 흡수할 수 있다(Luo et al., 2018). 용매가 특정 온도 조건에서 물을 흡수/분리할 수 있다 하더라도 염수에 포함된 염 이온이 물과 함께 이동한다면 처리수의 염 농도에는 변화가 없게 되며, 탈염화는 불가하게 된다. 따라서 최종 단계에서는 용매가 염 이온을 충분히 배제시키고 오직 물 분자와 선택적으로 상호작용을 가질 수 있는지의 여부를 평가함으로써 적정한 탈염화 용매를 선정할 수 있다.

3.2. 탈염화 용매 발굴을 위한 실험적 평가

Screening protocol의 첫 단계에 따라 아민 계열의 용매 중

Table 2. Selected amine solvents and its K_{ow} values

No.	Solvent Name	Abbreviation	K_{ow}
1	N-Propylcyclopropanemethylamine	PCPMA	1.53
2	N-(2,4-difluorobenzyl)-N-methylamine	2,4-DFBMA	1.94
3	[(2,6-dichlorophenyl)methyl](methyl)amine	2,6-DCPMMA	2.82
4	N-Isobutyl-2-butanamine	2-IBBA	2.39
5	N-sec-Butyl-1-butanamine	2BBA	2.57
6	N-Butylisobutylamine	BIBA	2.7
7	N-(3-Methylbutyl)cyclopropanamine	3-MBCPA	2.51
8	(2-FLUOROBENZYL)METHYLAMINE	2-FBMA	1.74
9	3-FLUORO-N-METHYLBENZYLAMINE	3-FMBA	1.74
10	N-Amyl-N-butylamine	ABA	3.27
11	2-METHOXY-N-METHYLBENZYLAMINE	2-MMBA	1.62
12	N-methyl-N-[4-(trifluoromethyl)benzyl]amine	MTFMBA	2.5
13	Dipentylamine	DPeA	3.76
14	N-Butylcyclohexanamine	BCHA	3.57
15	Propanamine, N-cyclohexylmethyl-	CHMPA	3.57
16	3-Benzylamino-1-propanol	3BAP	1.05
17	N-(4-ethoxybenzyl)-N-methylamine	4-EBMA	2.11
18	Benzylbutylamine	BBA	2.59
19	N-(1-Phenylethyl)-1-propanamine	1-PEPA	2.93
20	N-(4-Methylbenzyl)-1-propanamine	4-MBPA	3.06
21	N-Benzyl-3-buten-1-amine	3-BBA	2.87
22	2-Methyl-N-(2-phenylethyl)-1-propanamine	2-MPEPA	3.2
23	N-Benzyl-3-methyl-1-butanamine	3-BMBA	3.43
24	N-Benzyl-1-cyclobutylmethanamine	BCBMA	3.31
25	N,N'-Diisobutyl-1,6-hexanediamine	DIHDA	4.08
26	Dibenzylamine	DBeA	2.67
27	1-(4-Biphenylyl)-N-methylmethanamine	BPMMA	3.3
28	N-benzylphenethylamine	BPEA	3.51
29	Dibutylamine	DBA	1.7
30	Dipropylamine	DPA	2.83

K_{ow} 값이 1보다 큰 용매 30종을 선정하여 Table 2에 나타내었다. 해당 용매들은 염수와 혼합 시 수층과 완전히 혼화되지 않는 비극성 용매들이지만 용매의 용해도 특성에 따라 물 분자와 수소결합을 통해 일부 물을 용매층으로 흡수시킬 수 있는 특성이 있다. 이러한 용해도 특성은 일반적으로 K_{ow} 값이 증가함에 따라 감소하며 이는 용매의 비극성도가 증가함에 따라 용매와 물 분자 사이의 반발력이 증가하여 수소결합을 형성하는 것이 어렵기 때문이다. 용매가 물과 수소결합할 수 있는 적정 K_{ow} 값의 범위를 선정하기 위하여 용매의 K_{ow} 값과 Karl-Fischer 분석법으로 분석된 용매의 물 흡수율과의 상관관계를 Fig. 3에 나타내었다. 가장 낮은 K_{ow} 값(1.05)을 가지는 3BAP는 42 %의 높은 물 흡수율을 가지며, 용매의 K_{ow} 값이 증가함에 따라 용매의 물 흡수율은 급격하게 감소하는 경향을 나타냈다. 특히 K_{ow} 값이 3 이상인 용매들은 대부분 염수와 혼합될 때 용매층으로 흡수되는 물의 함량이 5 % 이하로 감소하여 물 분자와 거의 수소결합을 하지 못하는 것으로 나타났다. 따라서 탈염화 공정 적용을 위한 용매는 1 ~ 3 범위의 K_{ow} 값을 가지는 아민 계열 용매들 중에서 선별되어야 한다.

물 흡수 효율 5 % 이상을 확보하며 동시에 1 ~ 3 사이의 K_{ow} 값을 가지는 용매 14종을 2차 선정 용매로 압축하였으며, 해당 용매를 대상으로 상온(25 ℃)과 고온(80 ℃)에서의 수분함량의 변화를 Karl-Fischer로 측정한 값을 Fig. 4에 나타내었다. 선정된 모든 아민 계열 용매들은 온도가 증가함에 따라 용매의 수분 함량이 감소하였으며, 이 수분함량의 차이만큼 용매로부터 물이 배출됐음을 의미한다. 가열 전/후의 수분함

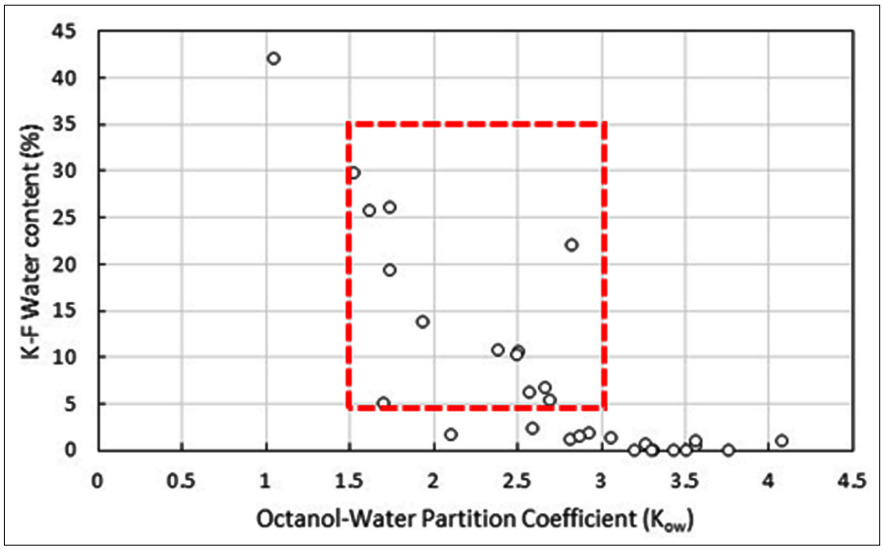

Fig. 3. Correlation between the Kow value and water solubility of solvents.

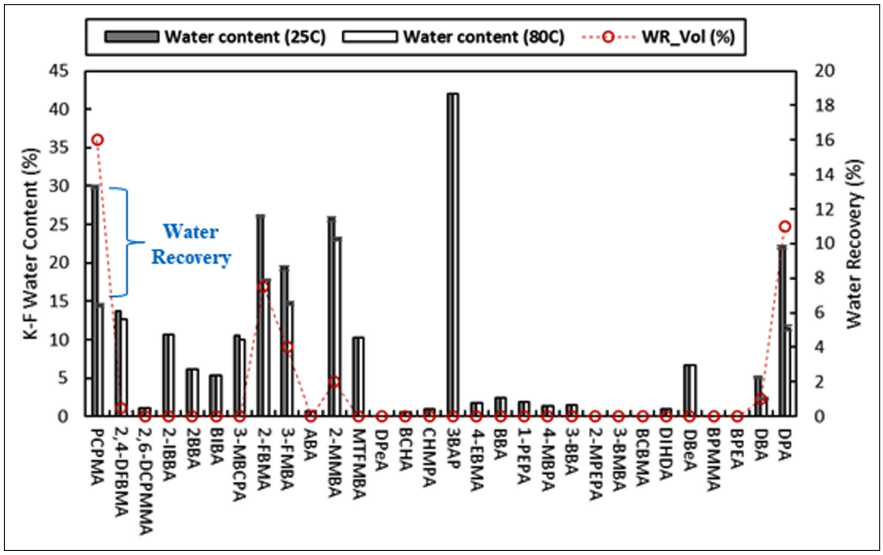

Fig. 4. Comparison of the water content (%) and water recovery efficiency (%) depending on various solvents through the solvent desalination extraction. Water content is the amount of water absorbed in the solvent and was estimated by measuring the Karl-Fischer water content of the sample obtained in Fig. 1 (c) step.

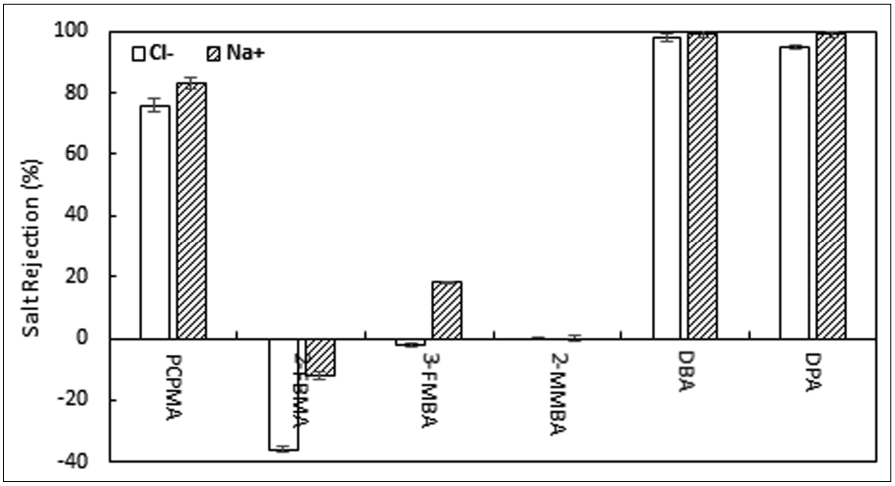

Fig. 5. Salt rejection efficiency(%) of five different solvents selected from the theoretical screening protocol

량 차이는 실제 회수된 물의 부피와 거의 일치하였으며, 이는 Karl-Fischer 분석을 통해 계산된 물 회수율과 실제 물 회수율이 상호 호환적임을 알 수 있다. 단, 실제 회수된 물의 부피가 Karl-Fischer 분석 값을 바탕으로 계산된 물 회수율의 차이보다 약 1 % 범위 내에서 더 높은 경향이 있었으며, 이는 용매와 물의 상호 용해도로 인하여 회수된 처리수 내에도 소량의 용매가 용해되어 있기 때문인 것으로 판단된다(Bajpayee, 2012). 따라서 용매추출 탈염화의 상용화를 위해서는 처리수 내의 잔류 용매 처리를 위한 추가적인 연구가 지속적으로 수행되어야 할 것으로 판단된다. 한편, 선정된 모든 용매들이 온도 변화에 따라 가변적인 물 용해도를 가지지는 못하였으며, PCPMA (15.4 %), 2-FBMA (8.3 %), 3-FMBA (4.6 %), 2-MMBA (2.6 %), DBA (2.8 %), DPA (10.5 %)의 6개 용매만이 1 % 이상의 용해도 변화(물 회수)가 가능한 것으로 나타났다(Fig. 4). 특히, 3BAP, 2-MMBA와 같이 높은 물 흡수율을 가지더라도 온도변화에 의한 담수 분리 단계에서 물을 분리해내지 못하는 용매들이 존재하여, 낮은 K_{ow} 값을 가지는 용매가 담수화에 절대적으로 유리한 것은 아닌 것으로 판단된다. 이러한 물 흡수-회수율의 불일치한 경향은 본 연구에서는 명확하게 증명할 수는 없지만 기존 문헌에서 조사된 바와 같이 각각의 용매들이 온도에 따라 모두 다른 용해도를 가지기 때문인 것으로 판단된다(Stephenson, 1993). 다만, 해당 용매들은 여전히 상당량의 물을 포함하고 있기 때문에 향후 최적화된 분리 기술 개발을 통해 탈염화 용매로서 적용성이 개선될 가능성이 있을 것으로 판단된다.

상기 6개 용매로부터 회수된 물에 용해된 염 농도를 기준으로 탈염화 용매의 염 제거율을 측정하여 Fig. 5에 나타내었다. 6개의 용매 중 2-MMBA의 경우 Cl^-과 Na^+ 이온 농도 모두 초기 염수의 농도와 동일하였으며, 이는 용매가 물을 흡수/분리하는 과정에서 염 이온을 제거하는 능력이 없기 때문인 것으로 판단된다. 한편, 불소(F) 분자를 포함하고 있는 2-FBMA와 3-FBMA의 염 제거율은 Cl^- 이온을 기준으로 각각 -36 %, -2 % 및 Na^+ 이온을 기준으로 -12 %, 18 %로 조사되어, 오히려 물 분자보다 더 많은 염 이온이 용매로 흡수되는 것으로 나타나 해당 용매들은 탈염화에 적합하지 않은 것으로 판단된다. PCPMA의 경우 가장 높은 물 회수율(15.4 %)을 가짐에도 불구하고 염 제거율은 76 % (Cl^- 기준)로 DBA, DPA 보다 다소 낮았으며, DBA의 경우 이와 대조적으로 낮은 물 회수율(2.8 %) 대비 98 % (Cl^- 기준)로 가장 우수한 염 제거율을 가지는 것으로 나타났다. DPA의 경우 물 회수율(10.5 %)과 염 제거율(95 %) 측면에서 두 용매의 중간 정도의 성능을 확보할 수 있는 용매로 조사되었으며, 최대 10회까지의 반복실험 동안 물 회수율의 저하 없이 초기 용매와 유사한 담수화 성능을 확보할 수 있는 것으로 나타났다.

4. Conclusion

본 연구에서는 용매추출 탈염화 공정에 적용가능한 용매 선정을 위하여 수소결합, 극성 결합 등과 같은 분자간 상호작용 이론을 바탕으로 이론적인 screening protocol을 제안하고 이를 기준으로 선정된 용매들을 대상으로 물 회수율과 탈염 성능을 회분식 실험방법을 통해 평가하였다. 아민 계열 용매의 물 흡수 특성은 K_{ow} 값과 밀접한 관계가 있으며 1 ~ 3 사이의 K_{ow}를 가지는 비극성 용매들이 일부 물을 흡수할 수 있는 특성을 가지는 것을 확인하였다. Screening protocol에 따라 최종 선정된 6종의 용매 중 PCPMA, DBA, DPA의 세 용매로부터 75 % 이상의 염 제거 효율을 달성하여 탈염화 용매로서 활용가능성을 나타내었다. 본 연구는 기존의 용매추출 담수화 연구로부터 제시된 용매들을 바탕으로 담수화 기작을 설명하고 이를 바탕으로 향후 새로운 용매들을 발굴할 수 있는 이론적 기준을 제시하는 기초자료로 활용될 수 있다.

Acknowledgement

본 연구는 국토교통부의 “국토교통기술촉진사업 (19CTAP-C128926-03)”에서 지원되었으며, 이에 감사드립니다.

References

Alotaibi, S., Ibrhim, O. M., Luo, S., and Luo, T. (2017). Modeling of a continuous water desalination process using directional solvent extraction, *Desalination,* 420, 114-124.

Al-Qaraghuli A. and Kazmerski, L. L. (2012). Comparisons of technical and economic performance of the main desalination processes with and without renewable energy coupling, *Proceeding of the World Renewable Energy Forum*, May 13-17, 2012 (Denver, Colorado).

Bajpayee, A. (2012). *Directional solvent extraction desalination,* PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology.

Bajpayee, A., Luo, T., Muto, A., and Chen, G. (2011). Very low temperature membrane-free desalination by directional solvent extraction, *Energy Environmental Science,* 4(5), 1672-1675.

Chaalal, O. and Hossain, M. M. (2015). A small-scale membrane electro-dialyser for domestic use, *Membrane and Water Treatment,* 6(1), 43-52.

Chandran, P. and Shah, J. K. (2018). A molecular simulation approach to the computation of mutual solubility of water and organic liquids: Application to fatty acids, *Fluid Phase Equilibria,* 472, 48-55.

Choi, H. J., Park, Y. J., and Lee, S. M. (2012). Wastewater treatment using ultrafiltration and reverse osmosis process, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers,* 34(10), 678-683. [Korean Literature]

Choi, O. K., Kim, M., Cho, A. E., Choi, Y. C., Kim, G. D., Kim, D., and Lee, J. W. (2019). Fates of water and salts in non-aqueous solvents for directional solvent extraction desalination: effects of chemical structures of the solvents, *Membrane and Water Treatment,* 10(3), 1-11.

Coday, B. D. and Cath, T. Y. (2014). Forward osmosis novel desalination of produced water and fracturing flowback, *Journal of Americal Water Works Association,* 106(1), 55-66.

Davison, R. R., Smith, Jr. W. H., and Hood, D. W. (1960). Structure and amine-water solubility in desalination by solvent extraction, *Journal of Chemical & Engineering Data,* 5(4), 420-423.

Igunnu, E. T. and Chen, G. Z. (2012). Produced water treatment technologies, International journal of low-carbon technologies, *International Journal of Low-Carbon Technologies,* 9(3), 157-177.

Kwak, P., Pham, V. S., Kim, B., Chem, L., and Han, J. (2016). Enhanced salt removal by unipolar ion conduction in ion concentration polarization desalination, *Scientific Reports,* 6, 25349.

Luo, S., Pang, Y., and Luo T. (2018). A continuous directional solvent extraction desalination process realized with the aid of electro-coalescence, *Journal of Chemical Engineering & Process Technology*, 9(4), 392.

Luo, T., Bajpayee, A., and Chen, G. (2011). Directional solvent for membrane-free water desalination – A molecular level study, *Journal of Applied Physics,* 110(5), 054905.

McCalley, D. V. (2017). Understanding and manipulating the separation in hydrophilic interaction liquid chromatography, *Journal of Chromatography A,* 1523, 49-71.

Rish, D., Luo, S., Kurtz, B., and Luo, T. (2014). Exceptional ion rejection ability of directional solvent for non-membrane desalination, *Applied Physics Letters,* 104(2), 024101.

Robertson, C. C., Wright, J. S., Carrington, E. J., Perutz, R. N., Hunter, C. A., and Brammer, L. (2017). Hydrogen bonding vs. halogen bonding: the solvent decides, *Chemical Science,* 8(8), 5392-5398.

Sanap, D. B., Kadam, K. D., Narayan, M., Kasthurirangan, S., Nemade, P. R., and Dalvi, V. H. (2015). Analysis of saline water desalination by directed solvent extraction using octanoic acid, *Desalination,* 357, 150-162.

Stephenson, R. M. (1993). Mutual solubility of water and aliphatic amines, *Journal of Chemical & Engineering Data,* 38, 625-629.

Subramani, A., Baduzzaman, M., Oppenheimer, J., and Jacangelo, J. G. (2014). Energy minimization strategies and renewable energy utilization for desalination: a review, *Water Research,* 45(5), 1907-1920.