



계량서지적 분석을 활용한 핵심 담수화 기술의 연구 동향

Bibliometric analysis of twenty-year research trend in desalination technologies during 2000-2020

이경훈^{1,2}·김혜원¹·부찬희¹·백영빈³·곽노균⁴·김춘수⁵·정성필^{1,6*}

Gyeonghun Lee^{1,2}·Hye-Won Kim¹·Chanhee Boo¹·Youngbin Beak³·Rhokyun Kwak⁴·Choonsoo Kim⁵·Seongpil Jeong^{1,6*}

¹한국과학기술연구원 물자원순환연구센터, ²서울과학기술대학교 화공생명공학과, ³성신여자대학교 바이오생명공학과,

⁴한양대학교 기계공학부, ⁵공주대학교 환경공학과,

⁶과학기술연합대학원대학교 한국과학기술연구원스쿨 에너지-환경 융합공학과

¹Water Cycle Research Center, Korea Institute of Science and Technology,

²Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Seoul National University of Science and Technology,

³Department of Biotechnology, Sungshin Women's University,

⁴Department of Mechanical Convergence Engineering, Hanyang University,

⁵Department of Environmental Engineering and Institute of Energy/Environment Convergence Technologies, Kongju National University,

⁶Division of Energy & Environment Technology, KIST-school, Korea University of Science and Technology

pp. 001-014

pp. 015-025

pp. 027-037

pp. 039-052

pp. 053-061

pp. 063-069

pp. 071-081

pp. 083-091

pp. 093-100

Received 30 October 2020, revised 17 December 2020, accepted 23 December 2020.

*Corresponding author: Dr. Seongpil Jeong (E-mail: spjeong@kist.re.kr)

- 이경훈 (학부생) / Gyeonghun Lee (Student)
서울시 성북구 화랑로 14길 5, 02792 / 5, Hwarang-ro 14-gil, Seongbuk-gu, Seoul 02792, Republic of Korea
서울시 노원구 공릉로 232, 01811 / 232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Republic of Korea
- 김혜원 (박사후연구원) / Hye-Won Kim (Postdoctoral Researcher)
서울시 성북구 화랑로 14길 5, 02792
5, Hwarang-ro 14-gil, Seongbuk-gu, Seoul 02792, Republic of Korea
- 부찬희 (연구원) / Chanhee Boo (Researcher)
서울시 성북구 화랑로 14길 5, 02792
5, Hwarang-ro 14-gil, Seongbuk-gu, Seoul 02792, Republic of Korea
- 백영빈 (교수) / Youngbin Beak (Professor)
서울시 강북구 도봉로 76가길 55, 01133
55, Dobong-ro 76ga-gil, Gangbuk-gu, Seoul 01133, Republic of Korea
- 곽노균 (교수) / Rhokyun Kwak (Professor)
서울시 성동구 왕십리로 222, 04763
222, Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul 04763, Republic of Korea
- 김춘수 (교수) / Choonsoo Kim (Professor)
충청남도 천안시 천안대로 1223-24, 31080
1223-24, Cheonan-daero, Seobuk-gu, Cheonan-si, Chungcheongnam-do 31080, Republic of Korea
- 정성필 (선임연구원) / Seongpil Jeong (Senior Researcher)
서울시 성북구 화랑로 14길 5, 02792 / 5, Hwarang-ro 14-gil, Seongbuk-gu, Seoul 02792, Republic of Korea

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.

ABSTRACT

The global water shortage is getting more attention by global climate change. And water demand rapidly increases due to industrialization and population growth. Desalination technology is being expected as an alternative water supply method. Desalination technology requires low energy or maintenance costs, making it a competible next generation technology, with examples such as forward osmosis (FO), membrane distillation (MD), capacitive deionization (CDI), and electrodialysis (ED) to compete with reverse osmosis (RO). In order to identify recent research trends in desalination technologies (FO, MD, RO, CDI, and ED) between 2000-2020, a bibliometric analysis was conducted in the current study. The number of published papers in desalination technology have increased in Desalination and Journal of Membrane Science mainly. Moreover, it was found that FO, MD, RO, CDI, and ED technologies have been applied in various research areas including electrochemical, food processing and carbon-based material synthesis. Recent research topics according to the desalination technologies were also identified.

Key words: Bibliometric analysis, Desalination, Next generation desalination technology, Research trend, Reverse osmosis

주제어: 계량서지적 분석, 담수화, 차세대 담수화 기술, 연구 동향, 역삼투

1. 서 론

지구 온난화, 환경오염, 산업화, 인구증가 등으로 인해 전 세계적으로 물 사용량이 급증하였다. 또한, 수자원의 분포가 편중됨에 따라 세계 인구의 약 40% 이상이 식수난을 겪고 있으며, 2025년경 세계 인구의 1/3이 절대적 물 부족 지역에 거주하고, 2/3가 물 기근을 겪을 것으로 전망된다 (Brown, 2015). 이에 전 세계는 물 부족 문제를 해결하기 위하여 대체 수자원을 개발하고 다양한 노력을 기울이고 있다. 국내에서는 다양한 수자원을 통합 관리하고자 하는 통합 물 관리가 추진되고 있으며, 현재 기존 국토부에서 수행하던 정수 분야가 환경부로 이관되었다. 또한, 농업용수를 관리하는 농림부의 업무도 이관될 예정이다. 따라서, 안정적인 수자원 확보를 위하여 기존 수자원과 비전통 수자원을 포함하는 전체 수자원 관리에 대한 수요가 지속 발생할 것으로 예측된다.

최근 들어, 지구 전체 물 중 약 97.5%를 차지하는 해수는 대체 수자원으로 여겨지고 있다 (World Water Assessment Programme (United Nations), 2006). 이에 물 부족 문제를 해결하는 방안으로 해수 담수화 기술이 크게 주목을 받고 있다 (Nijmeijer and Metz, 2010). 해수 담수화 시장은 1965년 이후 연평균 15% 정도로 급속한 성장세를 보이며, 시장규모 역시 2018년 약 15조까지 커질 것으로 예상된다 (Lu et al., 2015). 이스라엘 Soreq 담수화 플랜트(620,000 m³/day) 담수화 기술의 경우 비용이 수도수 정도(0.405 \$/m³)까지 낮아졌으며 (Birch and Weaver, 2020), 중동 지역 및 미국 캘리포니

아, 싱가포르, 호주 등지에서 주요 수자원으로 활용되고 있다. 담수화 기술의 종류에는 크게 열을 이용하는 담수화 기술과 분리막을 이용하는 담수화 기술 그리고 전기화학 형 담수화 기술로 구분될 수 있다.

현재, 전 세계적으로 저 에너지형 또는 저비용 담수화 기술의 개발이 진행 중에 있다 (Alkudhiri et al., 2012; Drioli et al., 2015; Elimelech and Phillip, 2011; Khayet, 2011; McGovern and Lienhard, 2014). 또한, 최근 들어, 소재, 부품, 장비를 대상으로 탈일본 정책이 추진됨에 따라, 수처리 기술에서 활용되는 분리막 소재에 대한 국산화와 기술 개발에 대한 필요성이 증대되고 있다.

1995년에 역삼투(Reverse osmosis, RO) 기술이 적용된 담수화 플랜트의 전 세계 용량이 50%를 초과하게 된 이후로, RO 기술에 대한 다양한 기술 개발이 진행되어 왔다. 그 이후 RO 기술보다 필요 에너지 또는 비용이 적을 것으로 기대되는 차세대 담수화 기술(정삼투 기술(Forward osmosis, FO), 막증류 기술(Membrane distillation, MD), 축전식 탈염 기술(Capacitive deionization, CDI) 및 전기 투석 기술(Electrodialysis, ED) 등)이 상용화를 목표로 지속해서 연구가 수행 중이다. FO, RO, MD 기술은 분리막을 이용하는 기술이며, CDI와 ED는 전극과 이온 교환수지를 이용하는 기술이다. 또한, FO, CDI, ED 기술의 경우, RO 기술과 지표수 또는 기수 영역의 염농도에서 경쟁하고 있으며, MD 기술은 RO 기술이 적용될 수 없는 고농축 폐수를 포함하는 영역에서 RO 기술과 경쟁하고 있다. 즉, 각 기술들의 구동 원리나 소재 또는 공정 구성이 상이함에도 불구하고, RO 기술과 서로 다른 영역에서 경쟁하고 있음을 알 수 있어, 이 논문에서



는 해당 담수화 기술들을 포괄하여 연구를 수행하였다.

해수 담수화 분야의 세부 기술들에 관한 연구가 전문화되고 있어, 한 연구자가 앞서 검색한 5개 담수화 기술에 대하여 동시에 연구 동향을 모두 파악하기 어려운 실정이다. 하지만, 담수화 기술은 지표수 처리에 비하여 상대적으로 고염환경(기수 및 해수)을 대상으로 하며, 주요 경쟁 기술이 역삼투 기술 하나이기 때문에, 기술 및 공정에 대한 기술적 요구 조건이 비슷한 특징이 있다. 따라서, 한 분야의 연구 내용이 타 담수화 기술 연구로 확장되기에 유리한 장점이 있어, 담수화 기술의 전체적인 연구 동향 파악이 중요하다. 최근 다수의 논문이 발행되는 분야에서의 연구 개발 경향 파악을 위하여, AI 기술을 접목한 계량서지적 분석들이 수행되고 있다. 키워드를 이용한 분석만으로도 상당한 내용 파악이 가능할 수 있다.

따라서, 이 연구에서는 최근 5년간의 담수화 기술(FO, MD, RO, CDI 및 ED)을 대상으로 키워드를 이용한 논문 검색을 기반으로 담수화 기술별 연구 경향과 기술별 최근 주요 키워드를 파악하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1 기술별 및 게재 저널별 논문 수 분석

담수화 기술(FO, MD, RO, CDI 및 ED)을 대상으로 전문 논문 검색 사이트(www.sciencedirect.com)에서 2000년에서 2020년까지의 각 기술의 논문 수를 검색하였다. 또한, 검색된 각 담수화 기술별 논문들을 게재 저널별로 정리하여 그 숫자를 파악하였다. 추가로, www.sciencedirect.com에서 검색되지 않는 주요 저널인

Environmental Science and Technology(ES&T)에서의 각 담수화 기술별 논문 수를 저널 홈페이지에서 위와 같은 방식으로 검색하여 확보하였다 (pubs.acs.org/journal/esthag). 논문 수 검색과정에서 전체 논문 수보다 게재된 논문 수가 매우 적은 저널의 경우는 생략하였다.

2.2 키워드 기반 논문 검색 방법

모든 담수화 기술에 적용될 수 있을 만한 키워드를 저자들 사이에서 브레인스토밍 기법을 이용하여 찾았다.

담수화 기술 전체를 포괄하기 위한 desalination, 원수의 종류와 관련된 brackish water, concentrate or brine, seawater, waste water, water reuse, 도전성을 나타내는 challenge, 담수화 소재 기술과 관련된 electro-spun, fabrication, membrane, module, modification, nanomaterials, nanotube, titania, 공정 기술과 관련된 fouling, pre-treatment, process design, system, treatment, 세척과 관련된 backwash, cleaning, washing, 성능 및 비용과 관련된 cost, energy, energy consumption, performance, recovery, rejection, renewable, sustainable, 규모와 관련된 lab, pilot, 매커니즘과 관련된 driving force, mechanism, polarization, selectivity, 담수화 분야 최근 융합 연구 기술들인 COF(Covalent organic frameworks), in-situ monitoring, MOF(Metal organic frameworks), off-grid, ship, visualization이 있다. 이들은 담수화 기술의 연구 분류에 사용될 수 있을 것으로 판단되는 키워드(공통 키워드)이다. 또한 각 기술별로 주로 활용되는 키워드(기술별 특정 키워드)를 아래 Table 1에 정리하여 나타내었다. 논문 검색 시, 연구 논문(Research article)과 총설(Review article)을 포함하였으며, 각 기술과 선정된 키워드들이 제목, 초록, 키워드에 포함되었을

Table 1. Keywords for trend analysis of the specific desalination technologies

	Keywords
FO	Concentration polarization, draw solution, high-salinity, ICP(internal concentration polarization), layer-by-layer, low-pressure, osmotic- backwash, reverse solute diffusion, support layer, thermolytic solute
MD	Configuration, de-wetting, heat-exchanger, heating, high-salinity, janus membrane, membrane restoration, nanophotonic, omniphobic, phase Inversion, solar, superhydrophobic, waste heat, zero liquid discharge
RO	CA (cellulose acetate), chlorine, energy recovery, feed spacer, intake, ion removal, layer-by-layer, optimization, osmotic backwash, polyamide, PA (polyamide), pressure exchanger, support layer, surface modification, zero liquid discharge
CDI	Adsorption, AgCl, carbon, electrode, faradaic reaction, FCDI (flow-electrode capacitive deionization), intercalation, ion removal, ion-exchange
ED	Ammonia, EDI (electrodeionization), ion-exchange membrane, VFA (volatile fatty acids)

때 검색되도록 하였다.

5종의 담수화 기술(FO, MD, RO, CDI 및 ED)을 검색하여 전체 논문 수를 확인하였으며, 각 담수화 기술과 키워드를 하나씩 묶어 검색하여(예시: ‘FO + membrane’, ‘FO + desalination’ 등) 각 기술에 대한 키워드별 논문 수를 파악하였다. 이는 같은 논문이 중복 검색되는 부분을 최대한 배제하기 위한 방안이었다. 그 후 각 담수화 기술별로 키워드를 포함하는 논문의 수(The number of searched paper including the keyword for each desalination technology, $N_{S.P.}$)를 검색된 전체 논문의 수(The number of whole paper for each desalination technology, $N_{W.P.}$)로 나누어 각 키워드의 존재비(Keywords occurrence fractions, KOF)로 나타내었다.

$$KOF = \frac{N_{S.P.}}{N_{W.P.}} \times 100 (\%) \quad (1)$$

(KOF: 키워드의 존재비(%), $N_{S.P.}$: 각 담수화 기술별로 키워드를 포함하는 논문의 수(건), $N_{W.P.}$: 담수화 기술 별 검색된 전체 논문의 수(건))

공통 키워드의 경우, 기술별 각 키워드의 존재비를 이용하여 평균(Ave_{KOF})과 표준편차(SD_{KOF})를 구하였다. 이후 키워드의 존재비의 변이계수(Coefficient of variation(C.V.) = SD_{KOF}/Ave_{KOF})과 평균(Ave_{KOF})을 이용하여 키워드에 따른 특성들을 구분하였다. Table 1에 표기한 키워드의 경우, 기술별 키워드의 비율을 이용하여 높은 키워드들을 도출하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 담수화 기술별 논문 수 및 저널별 게재 수 분석

3.1.1 담수화 기술별 총 논문 수 및 연도별 변화

Fig. 1에 2000~2020년까지의 각 담수화 기술별 총 논문 수와 각 담수화 기술별 연도별 논문 수의 변화를 조사하여 나타내었다.

RO 기술이 타 담수화 기술에 비해 가장 많은 논문이 게재되었으며, MD, ED, FO 및 CDI 순으로 총 논문 수가 많았다. 담수화 기술 분야 연구 논문의 경우 조사 기간 시작점인 2000년 이후 지속해서 그 수가 증가하는 것으로 나타났으며, RO를 제외한 나머지 차세대 담수화 기술의 논문의 비율이 점점 높아지고

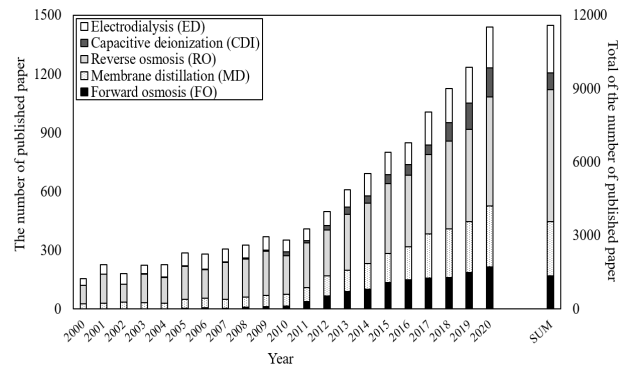


Fig. 1. The annual and Total number of research and review articles according to the desalination technologies from 2000 to 2020.

있다. 최근 들어, MD 및 CDI 기술의 논문 수가 타 담수화 기술보다 더 많아지는 경향을 보이고 있다.

3.1.2 담수화 기술의 저널별 게재 수 분석

Fig. 2(a-e)에 2000년부터 2020년까지 각 담수화 기술의 저널에 실린 건수 및 순위를 나타내었다. 공통적으로 CDI를 제외한 담수화 기술(FO, MD, RO 및 ED 기술)은 담수화 분야 전문지인 Desalination과 분리막 분야 전문지인 Journal of Membrane Science에 가장 많이 실렸다.

FO 기술 관련 논문의 경우, Journal of Membrane Science (406건)에 가장 많이 게재되었으며, 다음으로 Desalination (318건), Environmental Science and Technology(123건), Water Research(82건), Chemical Engineering Journal(66건)에 게재되었다. 타 담수화 기술에 비하여, FO 기술이 Bioresource Technology 저널에 다수(57건) 게재된 것은 FO 기술이 하수처리공정에서 생물반응조와 연계가 가능하기 때문이며, 일부 막을 이용한 생물반응조에서의 탈수 공정을 연구한 사례가 있었다.

MD 기술 관련 논문의 경우, Journal of Membrane Science(589건)에 가장 많이 게재되었으며, 다음으로 Desalination(556건), Separation and Purification Technology (215건), Environmental Science and Technology(119건), Chemical Engineering and Processing - Process Intensification(58건) 순으로 게재되었다. 특히, Applied Energy 저널에 게재된 논문들(34건)의 경우는 신재생에너지(태양열, 폐열), 고효율 막증류 시스템, 하이브리드 공정 및 vacuum multi-effect membrane distillation (V-MEMD) 공정에 관한 연구들을 포함하고 있었다. 또한, Journal of Food Engineering 에서는 대부분 다양한

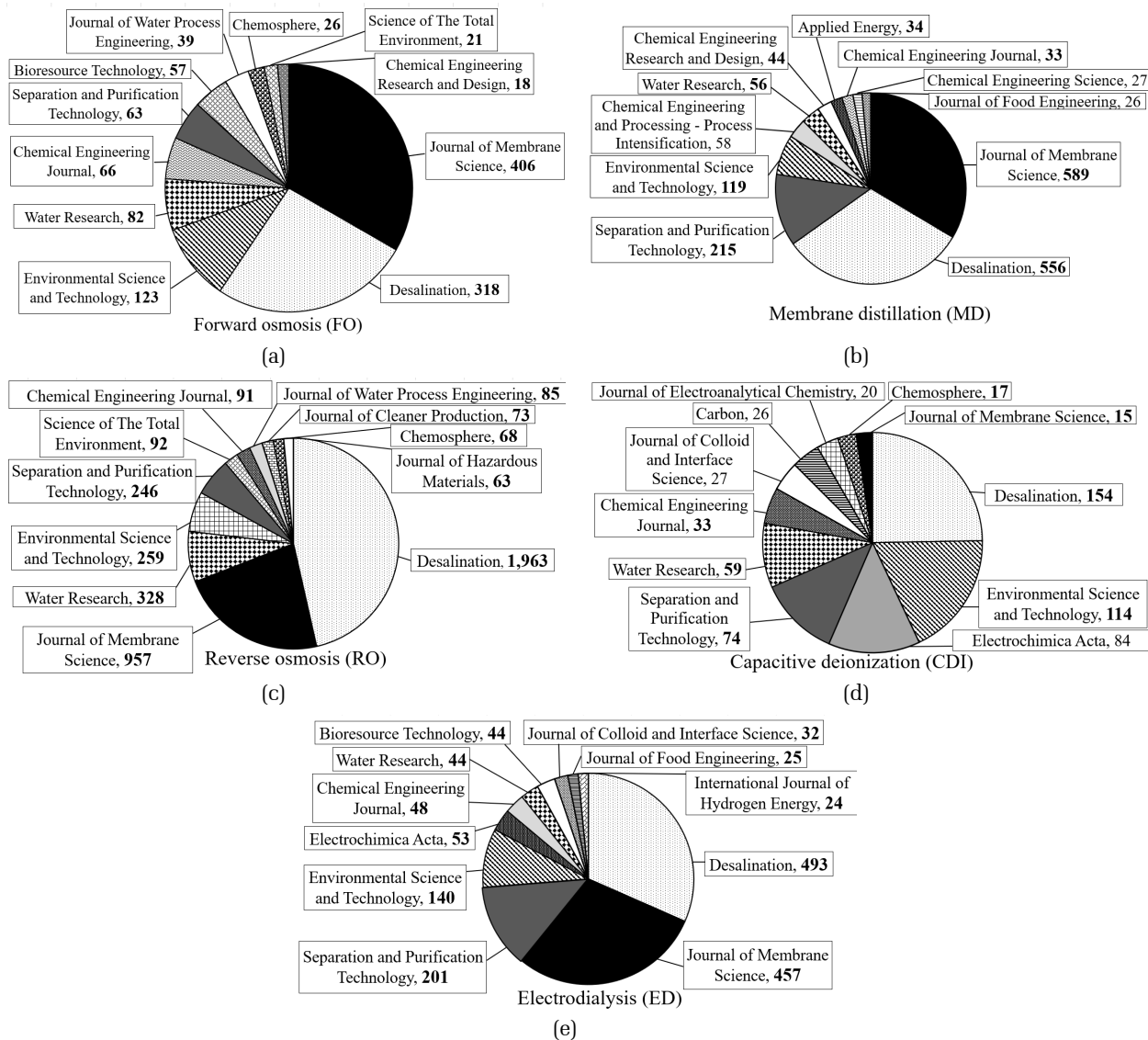


Fig. 2. The number of published research and review papers according to journal from 2000 to 2020.

주스(사과, 오렌지, 파인애플, 크랜베리, 블랙커런트 (Black currant), 백년초(Cactus pear), 카무카무(Camu camu) 등) 또는 치즈 생산 공정에서 발생하는 염수의 농축 연구(26건)를 포함하고 있었다.

RO 기술 관련 논문의 경우, Desalination(1,963건)에 가장 많이 게재되었으며, 다음으로 Journal of Membrane Science(957건), Water Research(328건), Environmental Science and Technology(259건), Separation and Purification Technology(246건) 순으로 게재되었다. RO 기술 관련하여 Journal of Hazardous Materials 저널에 다수의 논문이 게재되었는데, 그 주제에는 각종 대상

수(정수 및 하·폐수(산업폐수(olive mill, palm oil mill 폐수, 염색 폐수 등) 포함)) 및 매립장 침출수에서 존재하는 각종 유기 및 무기성 미량오염물질(의약품류(항생제 등), 농약류, 비소, 불소, 보론, 수은 등)의 처리 공정에서 고도산화공정(오존 및 UV/H₂O₂ 등)과 연계 처리하는 내용들이 포함되어 있었다.

CDI 기술 관련 논문의 경우, Desalination(154건)에 가장 많이 게재되었으며, 다음으로 Environmental Science and Technology(114건), Electrochimica Acta(84건), Separation and Purification Technology(74건), Water Research(59건) 순으로 게재되었다. CDI 기술의 경우

Electrochimica Acta에 84건의 논문이 게재되었는데, 대부분의 연구는 탄소 및 하이브리드형 전극에 관한 연구였으며, 탄소 전극의 성능 향상을 위한 메조 공극화 및 에어로겔 등의 구조변화에 관한 연구들이 많이 수행되었다. 또한, 소수의 연구로 MOF 및 supercapacitor와 연계하는 연구들이 포함되었다. Carbon 지에 26건의 논문이 게재된 것도 CDI의 전극이 탄소계인 것과 관련이 있었으며, 주로 탄소와 타 소재의 합성 및 구조 변화(공극 변화 및 에어로겔 형태)를 다루고 있었다.

ED 기술 관련 논문의 경우, Desalination(493건)에 가장 많이 게재되었으며, 다음으로 Journal of Membrane Science(457건), Separation and Purification Technology(201건), Environmental Science and Technology(140건), Electrochimica Acta(53건)에 게재되었다. ED의 경우 Electrochimica Acta가 53건, Bioresource Technology가 44건, Journal of Food Engineering에 25건의 논문이 게재되었다. Electrochimica Acta에 게재된 논문들의 경우 주로 무기계 다가 중금속(Cu, Cr, Co 등) 또는 무기계 비금속 물질(시안, 인, 암모니아)과 일부 유기오염물질(EDTA, 페닐알라닌, 메탈 알콕사이드)들을 처리대상으로 하고 있었다. ED 뿐만 아니라 RED에 대한 논문들도 다수 포함되었다. 또한, Bioresource Technology의 경우 ED 기술을 하수처리 공정이거나 수소 또는 탄소계 물질 생성 과정에서 암모니아와 VFA(Volatile fatty acid)제거에 주로 활용한 논문들이 게재되었다. Journal of Food Engineering에 게재된 논문들은 유청(Whey), 간장, 과일 주스, 해산물 농축액(Seafood cooking juices(mussel cooking juice, shrimp cooking juice)), 각종 산(구연산 및 주석산(타르타르산))의 처리에 ED 기술을 적용한 사례들이 포함되었다.

3.2 키워드 기반 논문 분석

3.2.1 담수화 기술 공통 키워드 분석

Table 2에 각 담수화 기술별 키워드와 각 검색된 논문에서 해당 키워드가 포함되는 비율을 나타내었다.

공통적으로 membrane, performance, desalination 키워드가 각 기술별로 검색된 담수화 논문들에서 전체 논문 대비 키워드의 포함 비율 기준으로 상위 6순위 안에 모두 포함되어 있었다. 특히, FO, MD, RO, ED 기술 논문에서는 membrane 키워드가 가장 많이 포함되어 있었으며, CDI 기술 논문에서는 membrane 키워드가 performance, desalination, energy, system의 다음으로 5번째 순서로 포함

비율이 높았다. 이는 CDI 기술의 경우, 분리막을 사용하지 않는 기술이 있기 때문으로 판단된다. 그리고 energy와 system, treatment 키워드가 3-4개 기술에 대하여 상위 키워드에 포함되어 있었다. 앞서 검색된 키워드들을 제외하고, FO 기술 논문에서는 water flux와 fouling 키워드가 자주 제목, 초록 및 키워드에 활용되었으며, MD 기술 논문에서도 water flux가 자주 검색된 키워드였으며, ED 기술 논문에서는 recovery가 자주 검색된 키워드로 확인되었다.

다수의 공통 키워드들 사이의 관련성을 파악하기 위하여 Fig. 3에 각 키워드의 각 담수화 기술별로 검색된 논문들에서의 존재비를 평균과 표준편차를 이용하여 그래프로 나타내었다. 여기서 키워드 존재비 평균값은 그 값이 클수록 각 기술 분야 논문에서 자주 사용된 것을 의미한다. 키워드 존재비의 표준편차가 작은 것은 5개 기술에서 해당 키워드가 항상 비슷한 순위에 있는 것을 의미하며, 표준편차가 큰 것은 기술별로 해당 키워드의 순위 변화가 큰 것을 의미한다.

Fig. 3에 키워드 존재비의 변이계수(Coefficient of variation(C.V.) = SD_{KOF}/Ave_{KOF})와 평균(Ave_{KOF})을 이용하여 공통키워드를 4개의 그룹으로 구분하였다.

키워드 존재비의 변이계수 값이 -0.5과 0.5 사이에 있는 키워드가 a) 그룹에 포함되었다. 그룹 a에 포함된 키워드들의 경우, 모든 기술에 공통적으로 검색되는 키워드로 판단되며, 특히 treatment, performance, system 등은 기술의 성능을 나타내는 키워드로서 주로 사용됨을 알 수 있다. 키워드 존재비의 변이계수 값이 -1보다 작거나 1보다 큰 키워드가 b) 그룹에 포함되었다. 그룹 b에 포함된 키워드들의 경우, 모든 기술에 공통적으로 검색되기보다 특정 기술에 주로 검색되는 키워드인 것으로 판단된다. 이 그룹에 포함된 키워드들의 존재비를 아래 Table 3에 나타내었다.

Fouling 키워드는 FO, MD, RO 그리고 ED 기술 논문에서 주로 활용되지만 CDI 기술에선 주로 활용되지 못했다. Polarization, waste water, water flux 키워드는 다른 기술 논문들에 비해 FO 기술 논문에서 제목, 초록, 키워드에 많이 검색되었다. Module 키워드의 경우, 다른 기술 논문보다 MD 기술 논문에서 주로 검색되었다. 키워드 존재비의 변이계수 값이 0.5보다 크고 1보다 작은 키워드 혹은 -1보다 크고 -0.5보다 작은 키워드가 c) 그룹에 포함되었다. 그룹 c에 포함된 키워드들의 경우, 모든 기술에 공통적으로 검색되면서도,



Table 2. Keyword distribution according to the desalination processes from 2000 to 2020 (unit: %, AveKOF: The averages of keywords occurrence fractions (KOF, the number of observed that keywords over the number of the paper of each desalination technology), SD_{KOF}: The standard deviations of keywords occurrence fractions (KOF))

	Backwash	Brackish water	Challenge	Cleaning	COF	Concentrate or Brine	Cost	Desalination	Driving force
FO	2.8	4.2	8.2	15.3	0.2	13.5	11.5	32.0	5.5
MD	0.2	1.9	6.0	8.1	0.0	18.1	13.2	36.8	3.6
RO	1.4	9.2	5.8	10.4	0.1	19.8	17.6	41.4	1.7
CDI	0.2	12.0	5.5	2.2	0.0	4.0	13.9	60.9	0.4
ED	0.1	7.3	3.7	4.8	0.0	21.7	12.5	26.1	1.3
Ave _{KOF}	0.9	6.9	5.8	8.2	0.1	15.4	13.7	39.4	2.5
SD _{KOF}	1.2	4.0	1.6	5.0	0.1	7.1	2.3	13.3	2.0

	Electro-spun	Energy	Energy consumption	Fabrication	Fouling	In-situ monitoring	Lab	Mechanism	Membrane
FO	0.1	27.8	9.5	6.4	34.6	0.3	2.7	11.7	91.7
MD	0.3	36.9	11.0	5.1	16.4	0.4	2.6	9.3	100.0
RO	0.0	27.5	10.7	2.4	24.5	0.6	2.6	9.6	73.4
CDI	0.1	34.3	15.8	4.9	3.0	0.1	1.3	12.0	27.9
ED	0.0	37.8	20.4	1.4	11.4	0.1	3.2	7.6	77.2
Ave _{KOF}	0.1	32.9	13.5	4.0	18.0	0.3	2.5	10.0	74.0
SD _{KOF}	0.1	4.9	4.5	2.1	12.1	0.2	0.7	1.8	28.0

	Modification	Module	MOF	Nano materials	Nanotube	Off-grid	Performance	Pilot	Polarization
FO	7.1	7.9	0.9	1.4	2.8	0.1	59.0	2.8	21.5
MD	0.6	21.2	0.2	0.7	2.3	0.3	49.4	4.3	9.8
RO	6.1	8.7	0.4	0.7	1.3	0.5	39.2	8.7	8.0
CDI	4.3	1.2	0.7	1.8	8.4	0.0	64.6	1.0	3.4
ED	5.7	2.5	0.1	0.3	0.5	0.5	34.0	5.7	6.1
Ave _{KOF}	4.8	8.3	0.4	1.0	3.1	0.3	49.2	4.5	9.8
SD _{KOF}	2.5	7.9	0.4	0.6	3.1	0.2	12.9	2.9	7.0

	Pre-treatment	Process design	Recovery	Rejection	Renewable	Seawater	Selectivity	Sustainable	System
FO	3.9	9.4	26.7	27.4	2.2	16.4	15.1	9.6	31.3
MD	2.0	15.1	20.1	18.9	3.9	12.2	8.8	7.7	35.0
RO	5.5	9.4	21.1	22.8	5.3	23.1	8.1	6.1	39.1
CDI	1.3	6.2	14.8	1.2	2.4	4.3	14.3	5.5	30.1
ED	2.6	8.8	25.4	2.2	5.3	10.3	18.0	6.1	31.5
Ave _{KOF}	3.1	9.8	21.6	14.5	3.8	13.2	12.9	7.0	33.4
SD _{KOF}	1.7	3.3	4.7	12.1	1.5	7.0	4.3	1.7	3.7

	Titania	Treatment	Visualization	Washing	Wastewater	Water flux	Water reuse	In-situ monitoring + Visualization
FO	0.1	32.8	0.9	0.5	29.4	66.8	10.4	1.1
MD	0.3	23.1	0.6	0.7	12.6	39.1	3.3	1.0
RO	0.1	35.2	0.7	1.0	19.4	25.7	9.5	1.3
CDI	1.2	23.9	0.4	0.7	8.9	0.4	1.5	0.6
ED	0.0	25.3	0.4	0.9	12.7	5.4	7.2	0.5
Ave _{KOF}	0.3	28.0	0.6	0.8	16.6	27.5	6.4	0.9
SD _{KOF}	0.5	5.5	0.2	0.2	8.1	26.9	3.9	0.3

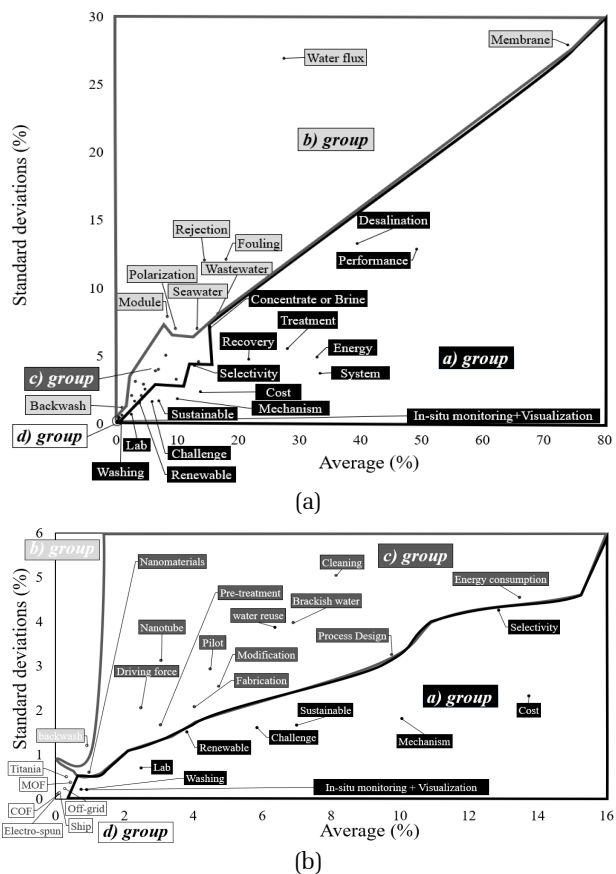


Fig. 3. The distributed graphs ((a) and (b)) using the averages (Ave_{KOF}) and standard deviations (SD_{KOF}) of keywords occurrence fractions (KOF, the number of observed that keywords over the number of the paper of each desalination technology) on the searched papers in the title, abstract and keywords on each desalination technology from 2000 to 2020 (the group of keywords 'a)' having $-0.5 < C.V. < 0.5$, 'b)' having $C.V. < -1$ or $C.V. > 1$, 'c)' having $0.5 < C.V. < 1$ or $-1 < C.V. < -0.5$, and 'd)' having $Ave_{KOF} < 1$) (C.V.(Coefficient of variation) = SD of the KOF/average of the KOF).

Table 3. Keyword distribution of the b group according to the desalination processes from 2000 to 2020 (unit: %, Ave_{KOF} : The averages of keywords occurrence fractions (KOF, the number of observed that keywords over the number of the paper of each desalination technology), SD_{KOF} : The standard deviations of keywords occurrence fractions (KOF))

	Backwash	Fouling	Membrane	Module	Polarization	Rejection	Seawater	Wastewater	Water flux
FO	2.8	34.6	91.7	7.9	21.5	27.4	16.4	29.4	66.8
MD	0.2	16.4	100	21.2	9.8	18.9	12.2	12.6	39.1
RO	1.4	24.5	73.4	8.7	8.0	22.8	23.1	19.4	25.7
CDI	0.2	3.0	27.9	1.2	3.4	1.2	4.3	8.9	0.4
ED	0.1	11.4	77.2	2.5	6.1	2.2	10.3	12.7	5.4
Average	0.9	18.0	74.0	8.3	9.8	14.5	13.2	16.6	27.5
Standard deviations	1.2	12.1	28.0	7.9	7.0	12.1	7.0	8.1	26.9

특정 기술에도 주로 검색되기도 하는 뚜렷한 특징을 가지지 못한 키워드인 것으로 판단된다. d) 그룹은 키워드의 존재비의 평균이 1보다 작은 키워드가 d) 그룹에 포함되었다. 그룹 d에 포함된 키워드의 경우, 키워드를 포함하는 논문 수가 전체 논문 수보다 매우 적은 것이다. 이는 기술의 특징을 파악하기에는 논문 수가 적어 구분이 어려워 그룹 구분을 하지 않았다.

3.2.2 담수화 기술별 특정 키워드 분석

Fig. 4에 각 기술별 특정 키워드의 존재비를 나타내었다.

FO 기술의 경우, FO 구동 매커니즘, 제막 및 공정 관련 키워드들이 자주 검색되었다. FO 구동 매커니즘과 관련된 키워드는 draw solution, concentration polarization, ICP(Internal concentration polarization), reverse solute diffusion, thermolytic solute, layer-by-layer, support layer 이었다. 특히, draw solution 키워드는 가장 높은 빈도로 검색된 주요 키워드였다. layer-by-layer, support layer 키워드의 경우, 매커니즘과 더불어 제막 및 분리막 구조 관련 연구에도 활용되는 키워드이다. FO 기술의 적용 조건과 관련된 키워드의 경우, 다수의 논문이 low pressure 그리고 high-salinity 키워드를 포함하고 있었다. FO 기술의 공정과 관련된 키워드는 osmotic backwash이었다.

MD 기술의 경우, wetting, 공정 특성, 제막, 에너지 및 고염환경 관련 키워드들이 자주 검색되었다. Wetting과 관련된 키워드는 wetting, de-wetting, membrane restoration 이었다. Wetting 키워드가 가장 높은 빈도로 검색되었는데, wetting은 타 공정에는 발생하지 않는 특이적인 현상이며, MD 분리막에 wetting이 발생하는 경우 원수가

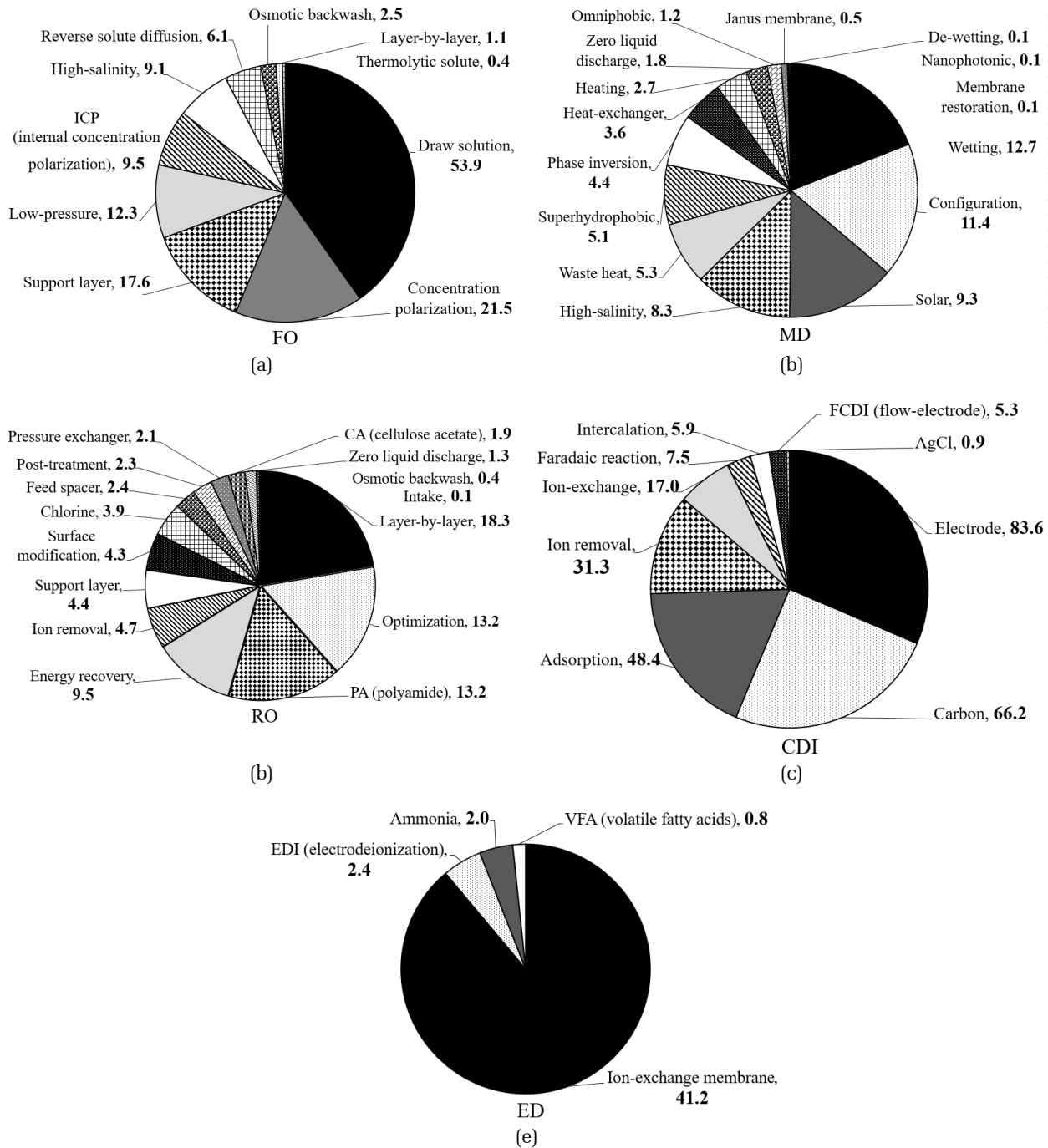


Fig. 4. Specific keyword distribution according to the desalination processes from 2000 to 2020 (unit: %).

MD 분리막을 직접 통과하여 생산수의 수질 저하를 일으키기 때문에 최근 들어 연구가 활발하게 진행되고 있다. 공정 특성과 관련된 키워드는 configuration 그리고 ZLD(Zero liquid discharge)이었다. 여기서, configuration은 DCMD(Direct contact membrane distillation), AGMD

(Air gap membrane distillation), VMD(Vacuum membrane distillation), SGMD(Sweep gas membrane distillation), PGMD (Permeate gap membrane distillation) 등 MD의 구성 방식을 설명하는 핵심 키워드이다. 제막과 관련된 키워드로서 superhydrophobic, phase inversion, omniphobic, janus



membrane, nanophotonic(Nanophotonics enhanced solar membrane distillation(NESMD))이었다. 이 키워드들의 경우, MD 기술에 사용되는 분리막 제조 방식 또는 분리막의 소수성, 광열 특성 등을 연구하는데 활용되고 있다. 에너지와 관련된 키워드는 solar, waste heat, heat-exchanger, heating이었다. MD기술의 경우, 운영비용 절감을 위하여 폐열 또는 태양열 기술과 접목하는 경우가 많기때문에, 에너지 관련 키워드의 존재비가 많았다. 4개의 에너지 관련 키워드 중 solar와 waste heat는 MD 기술논문에서의 존재비가 상위 5번째 안에 속하는 키워드였으며, 에너지 관련 키워드 존재비의 합이 21%로 가장 높았다. 이는 타 담수화 기술에 비해 MD에서 에너지에 대한 연구가 집중적 관심의 대상임을 알 수 있는 부분이다. MD 기술의 적용 조건과 관련된 키워드는 high-salinity이었다. MD 기술논문에서 존재비가 4번째 순위인 키워드로서, 일반적으로 MD 기술이 고염도의 조건에 자주 적용되는 상황과 일치한다.

RO 기술의 경우, 제막 및 표면 개질, 공정 그리고 분리막의 특성 관련 키워드들이 자주 검색되었다. 제막 및 표면 개질과 관련된 키워드는 layer-by-layer, polyamide(PA), support layer, feed spacer, cellulose acetate(CA), surface modification이었으며, 해당 키워드 존재비의 합이 58%로 가장 높았다. 공정 특성과 관련된 키워드는 optimization, energy recovery, pressure exchanger, post-treatment, zero liquid discharge(ZLD), osmotic backwash, intake이었다. 특히 optimization와 energy recovery는 RO 기술 논문에서 존재비가 각각 2위와 4위에 해당하였다. 분리막의 특성과 관련된 키워드는 ion removal, chlorine이었다. 이것은 RO 막이 이온 분리를 위한 최종처리 공정으로 주로 활용되며, RO 분리막이 polyamide로 만들어져 있어, 잔류 염소에 취약할 수 있기 때문에 자주 발견되는 것으로 판단된다.

CDI 기술의 경우, 전극, CDI 구동 매커니즘 그리고 공정 및 성능 관련 키워드들이 자주 검색되었다. 전극과 관련된 키워드는 electrode, carbon, intercalation, AgCl (Ag/AgCl electrode)이었다. 4개의 전극 관련 키워드 중 electrode와 carbon의 경우, CDI 기술논문에서의 존재비가 상위 첫 번째와 두 번째에 속하는 키워드였다. 이는 타 담수화 기술에 비해 CDI 기술에서 전극에 대한 연구가 집중적 관심의 대상임을 알 수 있는 부분이다. 공정 운영 과정에서 발생하는 이온의 이동 및 매커니즘 관련한 키워드들인 adsorption과 faradaic reaction도 자주 검

색되었다. CDI 기술의 공정 및 성능과 관련된 키워드로서 ion removal, ion-exchange, FCDI(Flow-electrode)가 검색 되었다.

ED 기술의 경우, 공정, 매커니즘 그리고 회수 또는 제거 관련 키워드들이 자주 검색되었다. Ion exchange membrane 키워드가 가장 높은 빈도로 검색되었는데, 이는 ED 공정에 이온 교환막이 주요 분리 기작으로 사용되기 때문이다. EDI(Electro deionization)은 ED에 이온 교환막이 추가된 형태의 모듈을 사용하는 기술이다. ammonia와 VFA(Volatile fatty acids)의 경우, ED 기술을 이용하여 회수(Recovery) 또는 제거하기 위한 대상이다.

3.3 담수화 기술별 최근 주요 키워드 분석

3.3.1 담수화 키워드에 따른 연도별 논문 건수 분석

Fig. 5에 공통 키워드 중 최근 연구가 진행되고 있는 것으로 판단되는 일부 키워드(In-situ monitoring + visualization, MOF, ship, off-grid)에 대한 연도별 논문 수를 나타내었다. 이 키워드들이 특별히 선정된 이유는, 최근 들어, 수처리 분야에서 신재생에너지로 구동하는 수처리 장치 및 공정에 대한 연구가 관심을 받고 있기 때문이다. 또한, 비용 절감을 위하여 집적화 및 대형화 되어온 중앙집중형 수처리 시스템이 문제가 발생하는 경우, 대응에 대한 위기가 발생할 수 있으며, 배관 길이가 길어져 교체 시 비용이 더 발생할 수 있는 점이 있어, 분산형 시스템에 대한 관심이 증대되고 있다. 또한, 최근 분리막의 막오염과 관련하여, 장치의 물 생산 능력 또는 수질자료를 이용하는 간접적 모니터링 방법을 벗어나, 분리막 표면에 발생하는 막오염 물질에 대한 직접 관찰하여 영상 또는 이미지를 기반으로 하여 막오염을 분석하는 연구가 관심을 받고 있다. 이 키워드 들에 대하여 그 논문 수 변화를 확인해 본 결과, 4개의 키워드 모두 2010년대에 들어서서 논문 수가 증가하였다.

In-situ monitoring과 visualization 키워드의 경우, RO 기술 논문에선 2002년부터 꾸준히 검색되었다. FO와 MD 기술의 경우, 2011년을 기점으로 검색된 논문 수가 증가하였으며, 특히 2019년에 MD 기술 관련 논문에서 제목, 초록 및 키워드에 주로 활용되었다. CDI와 ED의 경우, 다른 기술들에 비해 검색된 논문 수가 적으나, 11년부터 꾸준히 검색되었다.

MOF 키워드의 경우, 2019년부터 RO 기술 논문

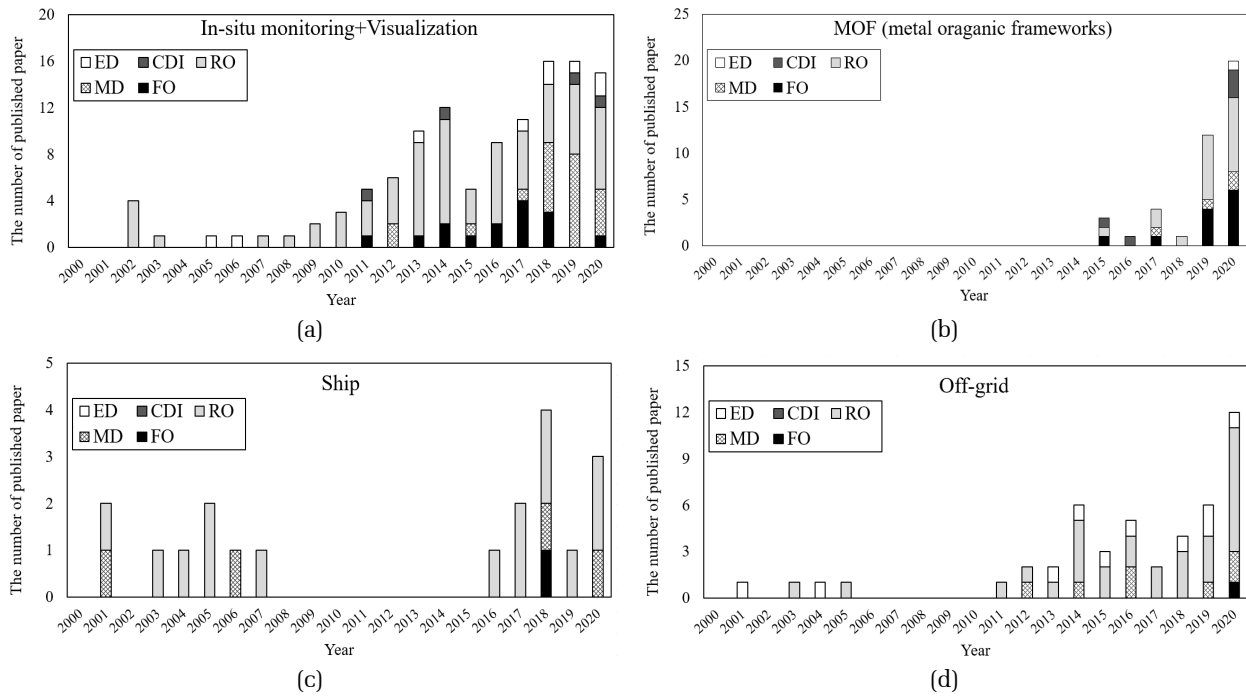


Fig. 5. The annual number of research and review articles with keywords according to the desalination technologies (a: In-situ monitoring과 visualization, b: MOF(metal organic frameworks), c: ship, d: off-grid).

서, MOF 키워드가 자주 검색되었으며, 20년 또한 검색된 논문 수가 증가하였다. 또한, FO 기술도 비슷한 경향을 띠었으며, 다른 기술의 경우 검색된 논문 수가 FO와 RO에 비해 적으나 증가하였다.

Ship 키워드의 경우, RO와 MD 기술 논문에서 제목, 초록 및 키워드에 주로 활용되었다. 2001년부터 2007년까지 1건 혹은 2건의 논문에서 검색되었다가, 16년부터 다시 꾸준히 검색되었다.

Off-grid 키워드의 경우, 2001년부터 2005년까지 1건의 논문에서 검색되었다가, 2011년을 기점으로 RO와 MD 기술 논문에서 꾸준히 검색되었다. 이것은 RO와 MD 기술이 신재생에너지 시스템과 결합되는 형태의 연구가 진행되었기 때문이라 판단된다. 또한, ED 기술의 경우, 매해 1건씩 꾸준히 제목, 초록 및 키워드에 활용되었다.

3.3.2 담수화 기술에 따른 특정 키워드 연도별 논문 건수 분석

Fig. 6에 각 기술의 특정 키워드 중 기술별 최근 연구가 진행되고 있는 것으로 판단되는 일부 키워드 키워드의 연도별 그래프를 나타내었다.

FO 기술의 경우, 2011년을 기점으로 공정과 관련된 osmotic backwash 키워드가 제목, 초록 및 키워드에 꾸준히 검색되었으며, 17년과 20년은 6건 이상의 논문에서 검색되었다. 또한, FO 기술의 매커니즘과 관련된 layer-by-layer와 thermolytic 키워드는 11년 이후부터 1건 이상의 논문에서 검색되었다.

MD 기술의 경우, 에너지와 관련된 heat-exchanger 키워드가 2001년 이후로 논문에서 제목, 초록 및 키워드에 꾸준히 활용되었다. 특히 12년을 기점으로 활용된 논문 수가 증가하였으며, 20년에는 활용된 논문 수가 상당히 증가하였다. 또한 제막과 관련된 phase inversion 키워드 역시 2003년 이후로 꾸준히 MD 기술 논문에서 검색되었으며, 2012년 이후로 매년 5건 이상의 논문에서 제목, 초록 및 키워드에 활용되었다. 이 외에도, 제막과 관련된 omniphobic, janus membrane 등의 몇몇 키워드가 16년을 기점으로 MD 기술 관련 논문에서 조금씩 검색되었다. 공정과 관련된 ZLD (Zero liquid discharge) 키워드는 2008년 이후 1건씩 논문이 검색되었고, 2016년 이후 4건 이상으로 검색된 논문 수가 증가하였다.

RO 기술의 경우, 제막 및 표면 개질과 관련된 CA (Cellulose acetate) 키워드가 조사 기간 시작점인 2000년 이후 꾸준히 제목, 초록 및 키워드에서 활용되었다.

- pp. 001-014
- pp. 015-025
- pp. 027-037
- pp. 039-052
- pp. 053-061
- pp. 063-069
- pp. 071-081
- pp. 083-091
- pp. 093-100

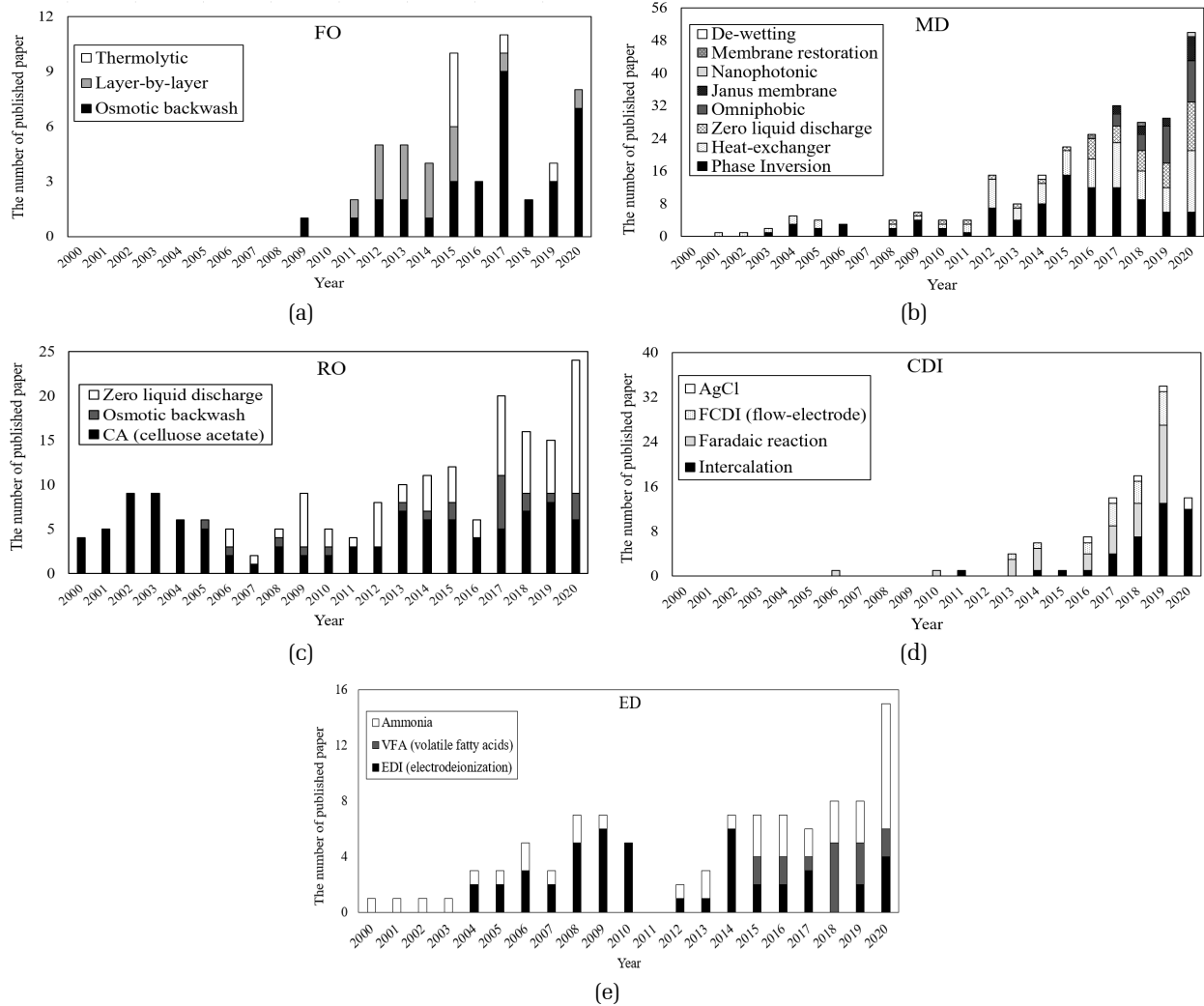


Fig. 6. The annual number of research and review articles with specific keywords according to the desalination technologies.

또한, 공정과 관련된 zero liquid discharge 키워드 역시 2006년 이후 RO 기술 관련 논문에서 검색되었으며, 2017년부터 검색된 논문 수가 이전해보다 상당히 증가하였다. 공정과 관련된 osmotic backwash 키워드의 경우, 2005년 이후 1, 2건씩 RO 기술 관련 논문에서 검색되었다.

CDI 기술의 경우, 2013년을 기점으로 특정 키워드가 검색된 논문 수가 증가하였다. 특히, 매커니즘과 관련된 intercalation와 faradaic reaction 그리고 공정과 관련된 FCDI(Flow-electrode) 키워드가 1건 혹은 그 이상의 논문에서 제목, 초록 및 키워드에서 활용되었으며, 매년 검색된 논문 수가 증가하였다. 전극과 관련된 AgCl 키워드는 16년 이후 1건의 논문에서 매년

CDI 기술 관련 논문에서 검색되었다.

ED 기술의 경우, 조사 기간 시작점인 2000년 이후 꾸준히 ammonia 키워드가 EDI 기술 관련 논문에서 검색되었으며, 매커니즘과 관련된 EDI(Electrodeionization) 역시 2004년 이후부터 꾸준히 검색되었다. 또한 VFA (Volatile fatty acids) 키워드의 경우, 2015년 이후 1건 이상의 논문에서 검색되었다, 특히, 20년에는 다른 해보다 세 개의 키워드가 제목, 초록 및 키워드에 활용된 논문 수가 가장 많았다. 각각의 담수화 기술 논문에서 다양한 분야의 키워드가 최근에 활용되었다.

5개 담수화 기술의 브레인스토밍을 기반으로 한 키워드 분석을 통하여 최근 연구되고 있는 주제들이 검색될 수 있음을 확인하였으며, 해당 키워드들이 지속



적으로 연구가 수행되고 있음을 확인하였다.

4. 결 론

이에 계량서지적 분석을 통해 20년간 5개 담수화 기술(FO, MD, RO, CDI 및 ED)을 대상으로 연구 동향과 기술별 최근 주요 키워드를 파악하였다. 전반적으로 담수화 기술 연구 논문수가 증가하고 있어, 지속적인 관심을 받고 있는 연구 분야임을 확인할 수 있었다. 각 기술별 주요 저널을 확인할 수 있었으며, 각 기술 별로 주요 저널이 다르게 존재하는 것을 확인하였다. 이를 통하여, 해당 기술의 연구 개발 시 참고할만한 주요 저널들을 유추할 수 있었다.

키워드의 존재비 값을 이용하여, 각 기술별로 연구에 자주 활용되는 키워드들을 정량적으로 도출해 볼 수 있었으며, 키워드 존재비의 변이계수 값을 이용하여 5개 기술에 두루 활용되는 공통 키워드들 간에 그룹을 구분할 수 있음을 알 수 있었다. 또한, 각 기술별로 최근 연구 키워드를 도출할 수 있었다.

약어 정리

- 정삼투 기술(Forward osmosis, FO)
- 막증류 기술(Membrane distillation, MD)
- 역삼투 기술(Reverse osmosis, RO)
- 축전식 탈염 기술(Capacitive deionization, CDI)
- 전기 투석 기술(Electrodialysis, ED)
- 각 담수화 기술별로 키워드를 포함하는 논문의 수 (The number of searched paper including the keyword for each desalination technology, $N_{S,P}$)
- 담수화 기술 별 검색된 전체 논문의 수(The number of whole paper for each desalination technology, $N_{W,P}$)
- 각 키워드의 존재비(Keywords occurrence fractions, KOF)
- 각 키워드의 존재비의 평균(The averages of keywords occurrence fractions, Ave_{KOF})
- 각 키워드의 존재비의 표준편차(The standard deviations of keywords occurrence fractions, SD_{KOF})
- 키워드의 존재비의 변이계수(Coefficient of variation, C.V.)
- 공유결합성 유기 골격체(Covalent organic frameworks,

COF)

- 금속유기골격체(Metal organic frameworks, MOF)
- 내부 농도 분극(Internal concentration polarization, ICP)
- 폐수 무방류 시스템(Zero liquid discharge, ZLD)
- 셀룰로스아세테이트(Cellulose acetate, CA)
- 폴리아미드(나일론)수지(Polyamide, PA)
- 흐름전극기반 축전식 이온제거법(Flow-electrode capacitive deionization, FCDI)
- 전기탈이온 장치(Electrodeionization, EDI)
- 저분자성 유기산(Volatile fatty acids, VFA)
- 진공 다중 효과 막 증류(Vacuum multi-effect membrane distillation, V-MEMD)
- 직접 접촉 막 증류(Direct contact membrane distillation, DCMD)
- 공극 간극 막 증류(Air gap membrane distillation, AGMD)
- 진공 막 증류(Vacuum membrane distillation, VMD)
- 동반 기체식 막 증류(Sweep gas membrane distillation, SGMD)
- 투과 간극 막 증류(Permeate gap membrane distillation, PGMD)

사 사

본 연구는 환경부 한국환경산업기술원(KEITI) 플랜트연구사업(146841)의 지원으로 수행되었습니다.

References

ACS Publications, Environmental Science & Technology. <https://pubs.acs.org/journal/esthag> (November 02, 2020).

Alkhudhiri, A., Darwish, N. and Hilal, N. (2012). Membrane distillation: a comprehensive review, *Desalination*, 287, 2-18.

Birch, H. and Weaver, R. (2020). *Desalination & Reuse Market Update July 2020*, Media Analytics Ltd., United Kingdom.

Brown, H. (2015). *Global Water Intelligence*. In: *Global Water Market 2015*, 53-72.

Drioli, E., Ali, A. and Macedonio, F. (2015). Membrane distillation: recent developments and perspectives, *Desalination*, 356, 56-84.

Elimelech, M. and Phillip, W.A. (2011). The future of seawater desalination: energy, technology, and the environment, *Sci.*, 333, 712-717.

pp. 001-014
pp. 015-025
pp. 027-037
pp. 039-052
pp. 053-061
pp. 063-069
pp. 071-081
pp. 083-091
pp. 093-100

- Khayet, M. (2011). Membranes and theoretical modeling of membrane distillation: a review, *Adv. Colloid Interf. Sci.*, 164, 56-88.
- Lu, S., Paling, M., Pollard, M., Quintavalle, M., Quigley, T. M., Studer, N. and Wittenberg, A. (2015). Global risks 2015, 14-44.
- McGovern, R.K. and Lienhard V.J.H. (2014). On the potential of forward osmosis to energetically outperform reverse osmosis desalination, *J. Membr. Sci.*, 469, 245-250.
- Nijimeijer, K. and Metz, S. (2010). Chapter 5 salinity gradient energy, *Sustain. Sci. Eng.*, 95-139.
- Science Direct. <https://www.sciencedirect.com> (November 02, 2020).
- World Water Assessment Programme (United Nations). (2006). *Water: A shared responsibility*, 2, UN-HABITAT. 121-122.