

이온교환수지 분체 특성에 대한 연구

허재용·구경미·장용원·강상현[†]

서경대학교 나노화학생명공학과
(2023년 12월 25일 접수, 2024년 2월 20일 수정, 2024년 2월 21일 채택)

A Study on Characteristics of Pulverized Ion Exchange Resins

Jaeyong Huh, Gyeongmi Goo, Yongwon Jang, and Sanghyeon Kang[†]

Department of Nano, Chemical and Biological Engineering, Seokyeong University, Seoul 02713, Korea

(Received December 25, 2023, Revised February 20, 2024, Accepted February 21, 2024)

요약: Total dissolved solids (TDS) 제거에 이용되는 이온교환수지는 컬럼에 충전시켜 사용하게 되는데, 이온교환 과정에서 이온성 물질과 이온교환수지의 충분한 접촉시간을 필요로 한다. 본 연구에서는 이온교환수지의 분체화를 통하여 짧은 접촉시간으로도 높은 TDS 제거 성능을 보이는 이온교환수지의 특성을 연구하였다. 흐름성 등을 고려한 분체의 최적 크기는 100 μm 이상임을 확인하였고, 250~500 μm 과 100~250 μm 크기의 최대 분쇄 수율은 각각 67.3%와 36.9%였다. 또한 100~500 μm 크기의 분쇄 수율은 분쇄 시간 2분에서 87.1%로 나타났다. 회분식(batch) 실험 조건에서 250~500 μm 크기의 분체가 95%와 99%의 제거율에 도달하는 시간은 분쇄 전(non-pulverized) 이온교환수지에 비해 각각 1.82배와 1.96배 더 빨랐다. 100~250 μm 크기의 분체는 각각 15.9배와 6.18배 더 빨랐다. 컬럼 테스트의 경우 분쇄 전 이온교환수지는 총 1.74 g, 250~500 μm 크기의 분체는 1.83 g, 100~250 μm 크기의 분체는 1.63 g의 NaCl을 제거하였다. 분체의 크기가 작아질수록 용량(capacity)이 약간 감소한 것으로 나타났다. 결과적으로 분체화된 이온교환수지를 사용하는 것이 접촉시간 대비 높은 TDS 제거 성능을 얻을 수 있는 방법임을 확인하였다.

Abstract: The ion exchange resin used to remove total dissolved solids (TDS) is used by being packed in a column, and sufficient contact time between the ionic material and the ion exchange resin is required during the ion exchange process. In this study, the ion exchange resin that exhibits high TDS reduction even with a short contact time through pulverization of the ion exchange resin was characterized. The optimal size of resin considering flowability was over 100 μm . The highest pulverizing yield were obtained that 250~500 μm size and 100~250 μm size were 67.3% and 36.9%, respectively. Also, the highest yield and the pulverizing time of 100~500 μm size was 87.1% and 2 minutes, respectively. Under batch test conditions, the time to reach a removal rate of 95% and 99% for 250~500 μm resins was 1.82 and 1.96 times faster than non-pulverized ion exchange resin, respectively. The 100~250 μm resins showed 15.9 times and 6.18 times faster, respectively. Under the column test, a total of 1.74 g of NaCl was removed by non-pulverized ion exchange resins, 1.83 g of NaCl was removed by 250~500 μm resins and 1.63 g of NaCl was removed by 100 and 250 μm resins. As the size of the resin decreased, the capacity slightly decreased. As a result, it was observed that the pulverized ion exchange resins could be a method of achieving high TDS removal performance under short contact time.

Keywords: TDS, ion exchange, ion exchange resin, pulverization

1. 서론

수용액 내 이온성 물질을 제거하는 대표적인 기술로 역삼투막(reverse osmosis membrane)과 이온교환수지

(ion exchange resin), 이온교환막(ion exchange membrane) 등이 있다.

역삼투막은 1 nm 이하의 기공크기와 표면전하를 이용하여 이온성 물질을 제거하는 기술로 재생이 필요 없

[†]Corresponding author(e-mail: shkang@skuniv.ac.kr; <http://orcid.org/0000-0002-0956-7252>)

다는 장점이 있지만, 농도에 따라 구동력인 압력을 제공해주기 위해 일정 이상의 수압을 필요로 하고 수압이 충분치 않은 경우 별도의 펌프를 필요로 한다.

이온교환막은 극성을 갖는 분리막을 이용하여 이온성 물질을 선택적으로 제거하는 기술로 양이온교환막, 음이온교환막 그리고 바이폴라막이 있다[1]. 이온교환막은 별도의 재생공정이 필요 없고 수압을 필요로 하지 않는다는 장점이 있지만, 구동력으로 전기를 공급해주어야 하고 막의 가격이 비싸다는 단점이 있다.

이온교환수지는 가교형 고분자지지체에 이온성 기능을 붙여 bead 형태로 제작한 소재로 양이온교환수지, 음이온교환수지, 킬레이팅(chelating) 수지 등이 있다. 이온교환막과 이온교환수지는 유입수 내 이온성 물질을 제거하여 배출한다는 유사한 작용기작을 가진다. 이들은 막과 bead 형태의 고분자라는 형태의 차이가 있고, 이온교환수지는 상대적으로 가격이 저렴하고 별도의 구동력을 필요로 하지 않는 장점이 있지만, 재생을 필요로 하고 일정이상의 이온교환시간을 필요로 하기 때문에 충전층(packed-bed) 컬럼을 사용해야 한다는 점에서 차이를 보인다[2-6].

이러한 충전층 컬럼은 유입수 내 이온성 물질들이 이온교환수지와 일정시간 이상 접촉하기 위한 접촉 시간(retention time)을 확보해주어야 하기 때문에 L/D 비율(Length/Diameter ratio, 일반적으로 3~4)을 고려하여 설계되어야 한다. 이온교환수지의 반응속도로 인한 L/D 비율의 적용은 이온교환수지를 적용하는 반응기나 모듈의 모양을 제한하는 요인이 된다[7-9].

이러한 단점을 극복하기 위한 방법으로 이온교환수지를 분쇄화 하여 사용하는 방법이 있다. 이온교환수지를 분쇄화 하면 bead 상태의 이온교환수지에 비해 이온교환속도가 크게 증가하는 것으로 알려져 있다. 유입수 내 이온성 물질은 외부확산에 의해 이온교환수지에 접근한 후, 이온교환수지 내부로 확산이 일어나면서 이온교환이 진행된다. 분쇄화된 이온교환수지는 bead 내에 존재하는 이온성 기능기가 외부로 노출되어 유입수 내 이온성 물질들이 확산에 의해 내부로 이동하는 시간을 줄여 이온교환속도를 크게 증가시키는 효과가 있다. 현재 이온교환수지는 가공하지 않은 형태로 특정 이온성 물질을 가지는 오수 정화 공정 등에 주로 사용되고, 분쇄형 이온교환수지는 원자력 발전소용 응축기 polishing 공정 및 불균질 이온교환막 제조 등에 적용하고 있으나, 이온교환수지 분쇄의 크기에 따른 거동특성에 대한

연구는 충분히 되어 있지 않다[10-13].

본 연구에서는 이온교환수지의 분쇄 크기에 따른 성능 및 차압 등 거동 특성에 대해 연구하여 분쇄형 이온교환수지의 활용 확대 가능성을 모색하고자 하였다. 특히 현재 상용화된 정수기는 정밀 여과(microfiltration) 필터, 한외여과막(ultrafiltration membrane), 역삼투막, 활성탄 필터를 이용하는 정수처리 시스템을 적용하는데, 이에 더해 분쇄화된 이온교환수지를 사용하여 이온성 물질을 추가적으로 제거하는 복합 필터 모듈을 구성할 수 있을 것으로 기대한다[14,15].

2. 실험

2.1. 실험재료 및 분석

본 연구에서 TDS 제거를 위해 혼합 이온교환수지(Lewatit® NM-60, LANXESS)를 사용하였으며 TDS 농도를 조절하기 위해 sodium chloride (NaCl, 99.5%, Junsei)를 사용하였다. TDS 농도는 conductivity meter (SD23, SevenDirect)를 이용하여 측정하였다.

2.2. 실험장비 및 투과 실험

이온교환수지의 분쇄를 위해 blender (WB-1, Wonder Blender)를 사용하였으며 분쇄 속도는 30,000 rpm이었다. 분쇄화된 이온교환수지를 크기별로 분리하기 위해 자동 sieve shaker (minor 200, Endcotts)를 사용하였다. Sieve는 1000 μm 이상, 500~1000 μm , 250~500 μm , 100~250 μm , 50~100 μm , 20~50 μm 의 기공 크기를 가지는 체(mesh)를 사용하였고 큰 기공 크기부터 작은 기공 크기로 순서대로 배열하여 분쇄된 이온교환수지를 분류하였다. 컬럼 테스트에는 25 mm ID \times 200 mm H 크기의 컬럼을 사용하였고, 펌프는 LongerPump사의 WT3000-FA를 사용하였다. 실험에 사용한 이온교환수지 분쇄의 최소 직경은 100 μm 로 90 μm 의 기공 크기를 가지는 sintered metal을 사용하여 이온교환수지의 컬럼에서의 유출을 방지함과 동시에 차압의 증가를 최소화하였다. 분쇄 내 미량의 분진에 의해 발생하는 유량 저하를 막기 위해 실험 초기 증류수를 이용한 세정(rinse) 과정을 거쳐 유량의 저하가 일어나지 않는 조건에서 본 실험을 수행하였다.

2.3. 실험 방법

2.3.1. 분쇄 시간에 따른 이온교환수지 분체의 크기 분포
습식이온교환수지의 수분을 제거하기 위한 건조 공정은 이온교환수지의 열분해를 최소화하기 위하여 60°C에서 진행하였다. 분쇄 및 sieving 1회에 사용한 이온교환수지는 건조 부피 기준으로 200 mL였으며, 이온교환수지 분쇄 시 발생하는 열과 분진의 최소화를 위해 분쇄 시간 30초 마다 분쇄를 중단하고 열과 분진을 제거하는 과정을 병행하였다. 또한 분쇄된 이온교환수지를 분류하기 위한 sieving 시간은 3분을 진행하였다. 분쇄 시간은 0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3분 동안 각각 진행하여 분쇄 시간에 따른 이온교환수지 분체의 크기 분포를 부피비로 측정하였다.

2.3.2. 이온교환수지의 크기에 따른 흐름성 및 swelling 정도

이온교환수지의 크기별 분체의 외관을 통해 흐름성을 판단하였다. 그리고 이온교환수지 분체의 흐름성 판단을 바탕으로 건조 상태의 분쇄 전, 250~500 µm, 100~250 µm 크기의 이온교환수지를 대상으로 선정하여 swelling test를 진행하였다. 매스실린더에 각 이온교환수지를 5 mL씩 넣은 후 증류수를 채워 이온교환수지의 부피 증가 정도를 관찰하였다.

2.3.3. Batch mode에서 이온교환수지 분체 크기에 따른 TDS 제거율 측정

분쇄 전, 250~500 µm, 100~250 µm 크기의 이온교환수지에 대해서 batch mode로 TDS 제거율 평가를 진행하였다. 각 실험은 50 mL의 이온교환수지를 NaCl 5 g/L 용액 300 mL에 넣어 진행하였고, 교반 속도는 80 rpm이었다.

2.3.4. 충전 컬럼에서 이온교환수지 분체 크기에 따른 차압, TDS 제거율, 용량, 처리한 부피 측정

분쇄 전, 250~500 µm, 100~250 µm 크기의 이온교환수지를 컬럼에 충전하여 차압, 제거율, 용량 등을 측정하였다[16,17]. 실험은 downflow로 진행하였으며, 유입수가 들어오는 컬럼의 윗면에 타공판을 배치하여 유입수가 컬럼의 단면에 고르게 분산되도록 하였다. 각 실험에는 swelling 후 50 mL의 크기별 이온교환수지가 사용되었고, 분쇄 전 이온교환수지는 25.7 g, 250~500 µm 크기의 분체는 24.39 g, 100~250 µm 크기의 분체

는 25 g의 건조 질량을 가지는 것으로 확인하였다. 실험은 NaCl 100 mg/L의 농도와 75 mL/min의 유량 조건에서 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 분쇄 시간에 따른 이온교환수지 분체의 크기 분포

Fig. 1에서 보는 바와 같이 분쇄시간이 늘어남에 따라 크기가 작은 분체의 비율이 점진적으로 증가함을 알 수 있었다.

Table 1은 이온교환수지의 분쇄시간(pulverizing time)과 크기구간별 수율(yield)을 나타낸다. 1000 µm 이상의 크기를 가지는 이온교환수지는 없었고, 500~1000 µm 크기의 이온교환수지는 분쇄를 하지 않았을 때 가장 높은 80%의 수율을 보였다. 그리고 250~500 µm 크기의 경우 1.5분 분쇄하였을 때 가장 높은 67.3%의 수율을 보였으며, 100~250 µm, 50~100 µm, 20~50 µm 크기의 경우 3분 분쇄하였을 때 각각 가장 높은 36.9%, 12.4%, 14.5%의 수율을 보였다.

위의 결과로부터 100~500 µm 크기를 모두 사용하는 경우 2분 분쇄하였을 때 87.1%, 100 µm 이상의 크기를 모두 사용하는 경우 0.5분 분쇄하였을 때 93.2%의 최대 수율을 얻을 수 있음을 확인하였다.

3.2. 이온교환수지의 크기에 따른 흐름성 및 swelling 정도

Fig. 2의 분쇄 전, 후의 이온교환수지의 외관을 관측하였을 때 분쇄 전 이온교환수지를 포함하여 100 µm 이상의 크기를 가지는 분체의 경우 흐름성이 충분히 존재하는 반면, 100 µm 이하의 크기를 가지는 분체의 경우 흐름성이 낮아 멍침 현상과 용기 벽면에 묻어나는 현상이 발생하였다. 따라서 이온교환수지 분체를 그대로 사용하는 공정의 경우, 분진이 발생하지 않고 흐름이 원활한 100 µm 이상의 크기를 가지는 이온교환수지를 사용하는 것이 바람직할 것으로 판단하였다.

Table 2는 이온교환수지 분체 크기에 따른 swelling 정도를 나타낸다. 매스실린더에 넣은 증류수 양에 따른 swelling 정도의 차이는 없었고 건조 상태의 분쇄 전 이온교환수지는 165%, 250~500 µm 크기의 분체는 170%, 100~250 µm 크기의 분체는 153%의 부피 증가가 발생하는 것을 확인하였다. 따라서 건조 상태의 이온교환수지를 일정한 부피를 가지는 용기에 충전하여 사용할 경

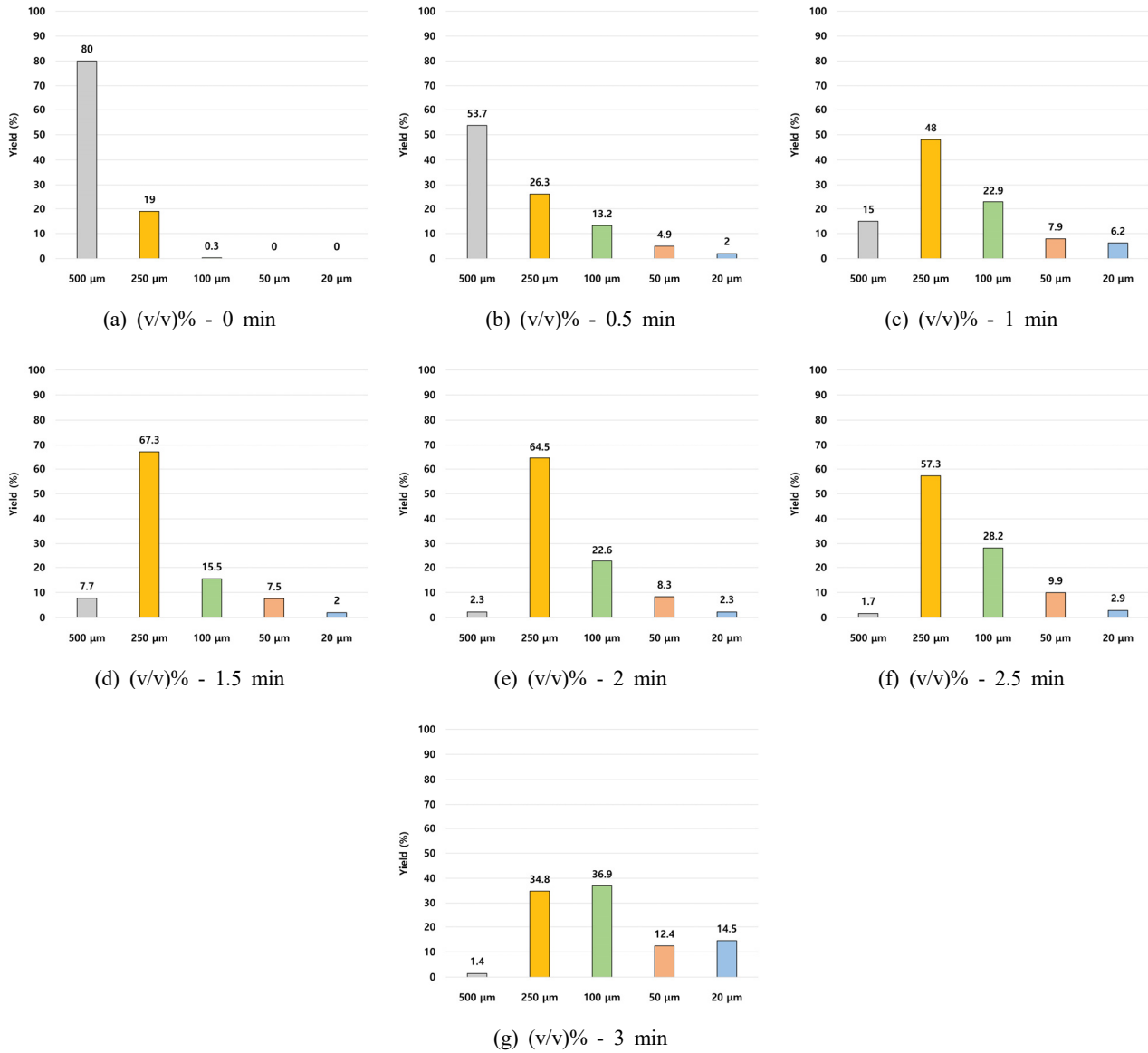


Fig. 1. Size distribution of ion exchange resin with pulverizing time.

Table 1. Pulverizing Time to Maximize a Size Distribution

Resin size (μm)	Pulverizing time (min)	(v/v) %
500~1000	0.0	80.0
250~500	1.5	67.3
100~250	3.0	36.9
50~100	3.0	12.4
20~50	3.0	14.5
100~500	2.0	87.1
100 and larger	0.5	93.2

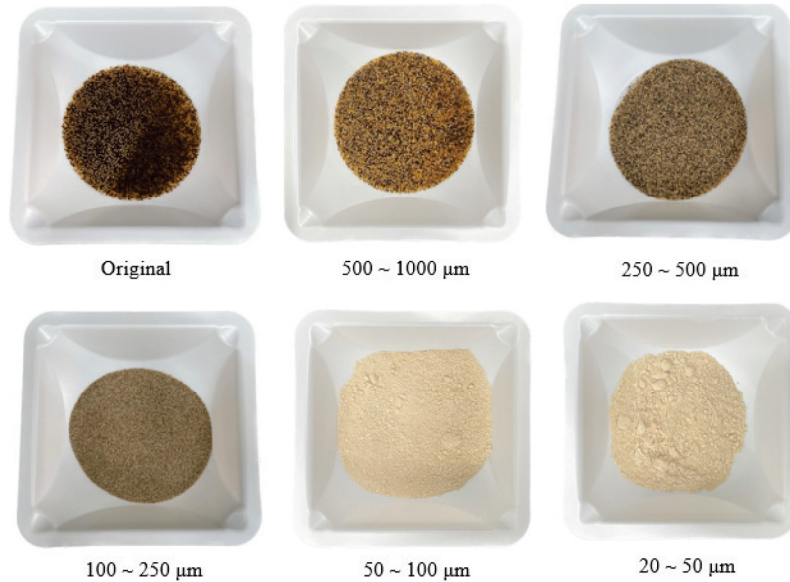


Fig. 2. Appearance and flowability of ion exchange resin with size.

Table 2. Degree of Swelling of Ion Exchange Resin with Size

Resin size (μm)	Before swelling (mL)	After swelling (mL)	Swelling (%)
Non-pulverized	5	8.25	165
250~500	5	8.50	170
100~250	5	7.65	153

우, 물 접촉 후에 증가하는 부피를 고려하여 충전량을 결정해야 할 것이다.

3.3. Batch mode에서 이온교환수지 분체 크기에 따른 TDS 제거율 측정

Fig. 3은 batch mode에서 시간에 따른 크기별 이온교환수지의 TDS 제거율을 나타낸 그래프이고, C₀는 용액의 초기 농도를, C는 시간에 따른 용액의 농도를 의미한다.

$$TDS\ rejection(\%) = \left(1 - \frac{C}{C_0}\right) \times 100 \quad (1)$$

Fig. 3에서 보는 바와 같이 이온교환수지의 크기가 작아짐에 따라 batch mode에서 TDS 제거 속도 또한 증가함을 알 수 있었고, 이 결과를 바탕으로 TDS 제거율이 95%와 99%에 도달하는 시간을 계산하였다.

Table 3에서 보는 바와 같이 분쇄 전 이온교환수지는 TDS 95% 제거에 4.29분, 99% 제거에 6.18분이 소요되

는데 반해 250~500 μm 크기의 분체는 95% 제거에 2.36분, 99% 제거에 3.16분이 소요되고, 100~250 μm 크기의 분체는 95% 제거에 0.27분, 99% 제거에 1분이 소요되는 것을 확인하였다. 이는 이온교환수지의 크기가 작아짐에 따라 이온교환 속도가 크게 증가하는 것을 의미한다. 이온교환수지 bead는 가교된 고분자 matrix에 이온교환이 가능한 기능기들을 가지고 있는데, 이온교환은 bead의 표면뿐만 아니라, matrix의 내부에서도 일어난다[10]. 다만, 표면과 다르게 내부에서의 이온교환은 이온교환물질이 matrix 내부로 확산되어 갈 수 있는 시간이 필요하다. 이온교환수지를 분체화하게 되면 matrix 내부에 있는 이온교환 기능기들이 표면으로 드러나는 효과가 있기 때문에 더 빠른 시간에 이온교환이 가능하게 된다.

3.4. 충전 컬럼에서 이온교환수지 분체 크기에 따른 차압, TDS 제거율, 용량, 처리한 부피 측정

Table 4에서 보는 바와 같이 분쇄 전 이온교환수지는 최대 300 mL/min의 유량 범위에서 차압이 발생하지 않

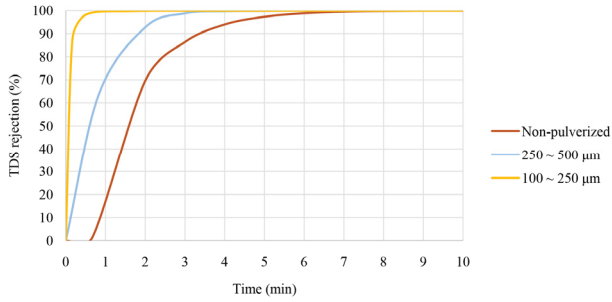


Fig. 3. Ion exchange rate with resin size in the batch mode.

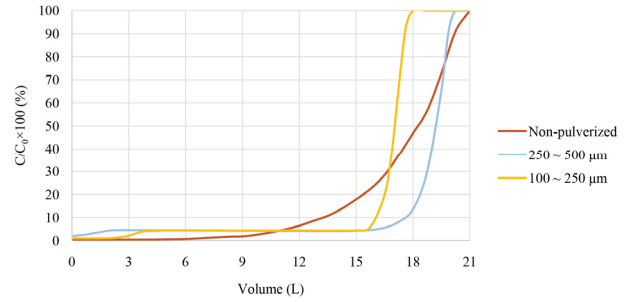


Fig. 4. Lifetime with ion exchange resin size.

Table 3. Time Taken to Reach the Rejection of 95 and 99% with Ion Exchange Resin Size

Resin size (μm)	95%	99%
Non-pulverized	4.29 min	6.18 min
250~500	2.36 min	3.16 min
100~250	0.27 min	1.00 min

Table 4. Pressure Drop with Ion Exchange Resin Size & Influent Flow Rate

Influent flow rate (mL/min)	Non-pulverized	250~500 μm	100~250 μm
	Pressure drop (bar)	Pressure drop (bar)	Pressure drop (bar)
75	0	0.00	0.16
100	0	0.00	0.22
150	0	0.03	0.35
200	0	0.11	0.48
250	0	0.15	0.61
300	0	0.19	0.74

왔고, 250~500 μm 크기의 분체는 유량 150 mL/min에서 0.03 bar의 차압이 발생하기 시작하여 300 mL/min의 유량에서 0.19 bar의 차압이 발생하였다. 그리고 100~250 μm 크기의 분체는 최소 유량 75 mL/min에서 0.16 bar 차압이 발생하였고, 유량이 증가함에 따라 차압이 증가하여 300 mL/min의 유량에서는 0.74 bar까지 차압이 발생하는 것을 확인하였다.

Fig. 4는 컬럼 테스트에서 통수량에 따른 크기별 이온교환수지에 대한 파과곡선(breathrough curve)을 나타낸다. 파과곡선은 이온교환수지를 통과한 용액의 부피에 대한 통과한 유입수의 농도(C₀) 대비 유출수의 농도(C)의 비(C/C₀ × 100%)를 나타낸다. 이 비율이 낮을수록 이온교환물질이 제거율이 높다는 것을 의미한다.

Fig. 4에서 보는 바와 같이 세 종류의 이온교환수지 모두 일정 부피까지는 높은 제거율을 유지하다가 특정

시점이 되면 급격하게 제거율이 저하되는 것을 볼 수 있다.

Table 5는 이 파과곡선을 바탕으로 이온교환수지 크기별로 제거한 NaCl의 양과 이온교환수지 1 g 당 제거한 NaCl의 양을 정리하였다.

Table 5에서 보는 바와 같이 분쇄 전 이온교환수지는 총 1.74 g, 250~500 μm 크기의 분체는 1.83 g, 100~250 μm 크기의 분체는 1.63 g을 제거하여 이온교환수지 분쇄 시 분체의 크기가 작아짐에 따라 제거한 NaCl의 양이 소폭 감소한 것을 확인하였다. 또한 이온교환수지 1 g 당 제거한 NaCl 양은 분쇄 전 이온교환수지가 0.076 g, 250~500 μm 크기의 분체가 0.075 g, 100~250 μm 크기의 분체가 0.065 g이었다.

이론상 이온교환수지의 크기가 작아져도 총량은 같기 때문에 같은 용량을 가져야 하지만 실제 실험 결과는

Table 5. The Amount of NaCl Removed by the Column Test and the Amount of NaCl per Gram of Resin

Resin size (μm)	Amount of removed NaCl by the column test (g)	Amount of removed NaCl per gram of resin (g)
Non-pulverized	1.74	0.076
250~500	1.83	0.075
100~250	1.63	0.065

이온교환수지 분쇄 시 분체의 크기가 작아짐에 따라 제거한 NaCl의 양도 약간 감소하는 것으로 나타났다. 이는 이온교환수지의 크기가 작아짐에 따라 충전 컬럼에서의 channeling 현상에 의해 이온교환수지가 효율적으로 사용되지 않았거나 이온교환수지를 건조, 분쇄하는 과정에서 발생하는 열로 인해 이온교환수지의 일부 기능이 분해되어 성능이 저하된 것으로 추정된다. 따라서 이온교환수지를 분쇄화하여 사용하는 경우에는 channeling이 생기지 않도록 잘 충전에 주의하여야 하며 건조, 분쇄하는 과정에서 최대한 열을 발생시키지 않도록 하는 것이 성능의 유지를 위해 바람직하다고 판단한다.

4. 결 론

본 연구에서는 이온교환수지 분체를 활용하기 위한 분쇄 수율, 흐름성, swelling 정도 및 batch mode에서의 이온교환 속도, 컬럼 테스트를 통한 이온교환수지 분체 크기에 따른 차압, TDS 제거율, 용량, 처리한 부피에 대해 연구하였다.

우선 이온교환수지의 분쇄화 시간에 따른 수율의 경우 분쇄 시간이 0~3분까지 증가함에 따라 작은 크기의 분체의 수율이 점차 증가하는 양상을 보이는 것을 확인하였다. 또한 이온교환수지 분체는 100 μm 이하의 크기에서는 흐름성을 갖지 않아 멍침 현상과 용기 벽면에 묻어나는 현상을 보여 효율적인 공정의 적용이 어렵다고 판단하였다. 250~500 μm 크기의 분체는 분쇄 시간 1.5분에서 67.3%, 100~250 μm 크기의 분체는 분쇄 시간 3분에서 36.9%로 가장 높은 수율을 보이고, 100~500 μm 크기의 분체는 분쇄 시간 2분에서 93.2%로 가장 높은 수율을 보이는 것으로 확인하였다. 향후 상용화 시 이온교환수지 가공 공정의 간소화를 위해 분쇄 시간 2분에서 발생하는 100~500 μm 크기의 분체를 모두 사용하는 것도 고려해 볼 수 있다고 판단한다.

건조된 수지가 물과 접촉하게 되면 분쇄 전 이온교환수지는 165%, 250~500 μm 크기의 분체는 170%, 100~

250 μm 크기의 분체는 153%의 swelling이 일어나기 때문에 건조된 이온교환수지를 이용해 필터 모듈을 만드는 경우 swelling에 의한 부피의 증가를 고려하여야 한다. 이온교환수지 분체를 이용한 batch mode TDS 제거 실험에서는 분체의 크기가 작아질수록 이온교환 속도가 크게 증가하는 것을 확인하였다. 따라서 이온교환수지의 부피 대비 높은 용량이 필요한 응용분야의 경우 이온교환수지 분체를 사용하여 높은 제거율의 확보가 가능함을 확인하였다. 용량 300 mL/min에서 이온교환수지의 크기별 차압은 분쇄 전 이온교환수지는 0 bar, 250~500 μm 크기의 분체는 0.19 bar, 100~250 μm 크기의 분체는 0.74 bar로 차압이 크지 않아 필터 모듈로 적용은 가능할 것으로 판단된다. 용량의 경우 이론상 이온교환수지의 크기에 관계없이 같은 부피에 대해서 모두 같아야 하지만, 분체의 크기가 작아짐에 따라 용량이 소폭 감소하는 것을 확인하였다. 이는 분쇄화된 이온교환수지의 충전 컬럼에서 channeling 또는 건조, 분쇄과정에서의 열에 의한 기능기의 손실 등으로 추정되지만, 보다 추가적인 연구가 필요하다고 사료된다.

본 연구에서는 이온교환수지의 분쇄화의 적용 가능성을 기초단계에서 살펴보고 향후 실제 상용 적용을 위해서는 이온교환수지를 분쇄하는 과정에서 발생하는 미분을 최대한 제거하는 방법과 pH 등 유출수의 수질 기준을 충족하는 것에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 생각된다.

본 연구결과를 바탕으로 이온교환수지 분말을 이용하여 이온교환막을 제조하는 것 외에도 이온교환수지 분체를 크기별로 배합하여 현재 상용화된 정수처리 시스템에 추가로 적용하여 제거율을 향상시킨 복합 필터 모듈로써 활용할 수 있을 것으로 생각된다.

감 사

본 연구는 산업통상자원부(과제번호: 20019441)의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

Reference

1. R. Pärnamäe, S. Mareev, V. Nikonenko, S. Melnikov, N. Sheldeshov, V. Zabolotskii, H. V. M. Hamelers, and M. Tedesco, "Bipolar membranes: A review on principles, latest developments, and applications", *J. Membr. Sci.*, **617**, 118538 (2021).
2. J. Kucera, "Desalination: Water from water", pp. 503-520, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA (2014).
3. F. Zhang, M. Chen, Y. Zhang, and R. J. Zeng, "Microbial desalination cells with ion exchange resin packed to enhance desalination at low salt concentration", *J. Membr. Sci.*, **417**, 28-33 (2012).
4. H. Paudyal, K. Inoue, H. Kawakita, K. Ohto, H. Kamata, and S. Alam, "Removal of fluoride by effectively using spent cation exchange resin", *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, **20**, 975-984 (2018).
5. M. Yoshida and K. Mine, "Flocculant, filter, and waste liquid treating method", US Patent 11,174,179, November 16 (2021).
6. K. H. Lee, B. M. Kil, C. H. Ryu, and G. J. Hwang, "Removal of alkali metal ion and chlorine ion using the ion exchange resin", *Membr. J.*, **30**, 276-281 (2020).
7. H. J. Jeong, H. K. Ahn, and I. H. Rhee, "A study on ion exchange characteristics with arrangement of ion exchange column", *Proc. KAIS Fall Conf.*, pp. 596-598, Korea (2006).
8. H. J. Yoon and H. J. Jeong, "A study on ion exchange characteristics with composition and concentration of electrolyte, ratio of ion exchange resin", *J. Korea Acad.-Ind. Coop. Soc.*, **7**, 727-732 (2006).
9. H. J. Jeong, H. K. Ahn, and I. H. Lee, "A study on ion exchange characteristics with composition and concentration of solution", *Proc. KAIS Fall Conf.*, pp. 599-601, Korea (2006).
10. P. A. Yarnell, "Encyclopedia of separation science", pp. 3973-3981, Academic Press, Cambridge, MA, USA (2000).
11. K. Fang, F. Peng, H. Gong, H. Zhang, and K. Wang, "Ammonia removal from low-strength municipal wastewater by powdered resin combined with simultaneous recovery as struvite", *Front. Environ. Sci. Eng.*, **15**, 1-10 (2021).
12. M. R. Stouffer, "Composite ion exchange media for liquid filtration systems", US Patent 10,576,466, March 3 (2020).
13. D. H. Kim, Y. E. Choi, J. S. Park, and M. S. Kang, "Development and application of cation-exchange membranes including chelating resin for efficient heavy-metal ion removal", *Membr. J.*, **27**, 129-137 (2017).
14. J. I. Cho, G. T. Kim, and Y. C. Ahn, "A study on characteristics of filters for domestic household water purifier", *J. Adv. Mar. Eng. Technol.*, **37**, 541-547 (2013).
15. S. K. Kwun, M. J. Yu, T. M. Jung, and M. S. Kim, "Nitrate removal in rural groundwater using ion exchange resin", *Korean J. Environ. Agric.*, **16**, 193-198 (1997).
16. http://www.iontec.co.kr/main/pds_view.asp?num=149&paper=1, May 27 (2008).
17. <https://www.samyangtrilite.co.kr/kr/support/case-study?keyword=%EC%9D%B4%EC%98%A8%EA%B5%90%ED%99%98%EC%88%98%EC%A7%80%20%EC%8B%A4%ED%97%98%EB%B0%A9%EB%B2%95>.