

CDI 모듈 설계와 전산유동해석

남 기 진 · 임 지 원[†]

한남대학교 화공신소재공학과
(2019년 10월 28일 접수, 2019년 10월 30일 수정, 2019년 10월 30일 채택)

The Capacitive Deionization Module Design and Its Analysis by Computational Flow Dynamics

Nam Ki Jin and Ji Won Rhim[†]

Department of Advanced Materials and Chemical Engineering, Hannam University, 1646 Yuseongdae-ro, Yuseong-gu,
Daejeon 34054, Korea

(Received October 28, 2019, Revised October 30, 2019, Accepted October 30, 2019)

요 약: 본 연구에서는 대면적을 지니는 CDI 모듈의 흐름 향상을 위하여 유체가 들어가는 유입구로부터 면적이 증가하는 직사각형 형태의 유로를 설계하였다. 이를 바탕으로 설계된 모듈 형태에 대해 공급수의 흐름성과 사영역의 유무를 파악하였고 CFD 전산 유체 역학 프로그램을 통해 유로 내의 내부 압력, 유선 그리고 속도 벡터 분포를 분석하였으며 실제 흐름 관측과 CFD 프로그램을 비교 분석하였다. 실험 결과 모든 유속 10, 20, 30 mL/min에서 유로 내 사영역이 거의 발생하지 않았으며 공급수의 흐름성도 일정하게 유지되어 추후 대면적을 가지는 CDI 공정에 적용이 가능할 것이라 판단된다.

Abstract: In this study, for the improvement of flow pattern with the CDI module that had the larger electrodes, it was designed with the rectangular type which is gradually wider from the inlet. Based on this, both the flow pattern of feed solution and dead zone were observed and the internal pressure, streaming line and velocity vector distribution were analyzed through the computational flow dynamics and compared with the experimental results. For all flow rates of 10, 20, 30 mL/min, there were no dead zones and the flow patterns were maintained constant. Therefore, it may be possible that the larger electrodes are applied to the CDI process.

Keywords: capacitive deionization (CDI), cell design, computational fluid dynamics, dead zone

1. 서 론

최근 사회에서 발생하는 인구화의 급증과 환경 오염에 따른 물 부족현상은 날로 갈수록 심각해지고 있으며 사용할 수 있는 깨끗한 형태의 물은 중요한 요소로 자리 잡고 있다[1-3]. 현재 지구에 존재하는 물의 97%는 사용할 수 없는 해수이며 이를 상업적인 유체로 제조하고 식수 담수화로 전환할 수 있는 탈염 공정은 21세기 사회에서 중요한 기술로 자리 잡고 있다[3-6]. 대표적인 탈염 공정으로는 reverse osmosis (RO), 다단증발법 (multi-stage flash distillation), 막 분리(membrane proc-

ess)가 있다[3]. 1980년까지는 탈염 기술 중 reverse osmosis (RO)공정이 시장을 지배하였지만 점차 새롭게 부상한 탈염 기술인 축전식 탈염 공정(capacitive deionization, CDI)은 수 처리 산업분야에서 입지를 얻고 있는 추세이다[5]. 축전식 탈염 공정은 1960년대에 처음 개념이 부상하기 시작하였으며 오늘날 해수 담수화의 최적화된 공정으로 여겨지고 있는 차세대 탈염 기술이다. 축전식 탈염 기술은 reverse osmosis (RO)보다 에너지 효율이 3배나 효율적이고 공정 자체도 간단하여 주목을 받아오고 있다. 축전식 탈염 공정의 원리는 공급수의 흐름을 모듈의 유입구를 통해 내부로 유도하여 다공성

[†]Corresponding author(e-mail: jwrhim@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-7803-2959>)

탄소전극 표면과 접촉시킨 후 간단한 전위차를 이용해 이온들을 흡착하여 해수 속 이온들을 제거하고 역 전위를 가해 탈착의 과정을 유도하여 전극을 재생시키는 연속적인 흐름 공정 기술이다[5-12]. 일반적인 축전식 탈염 공정의 구성은 두 개의 이중층 다공성 탄소전극과 두 탄소전극 사이의 원활한 전류 흐름을 도와주는 스페이서가 있다[10-12]. 축전식 탈염 공정은 여러 가지 복합적인 요인들에 의해 영향을 받는다. 예를 들면 전극 물질의 특성, 모듈의 내부로 흐르는 유체의 흐름 등이 있다[12].

결론적으로 다공성 탄소전극 표면을 흐르는 공급수의 흐름이 최적화될 때 내부 압력분포가 일정하게 감소되므로 최고의 탈염 효율을 얻어진다[11-14]. 이를 바탕으로 본 연구에서는 대면적을 지니는 CDI 공정에서 공급수가 최적의 흐름을 가지도록 유도하는 모듈의 모델링을 설계하였다. 이의 성능을 보기 위하여 유속 10, 20, 30 mL/min의 조건에서 유입구를 통해 들어온 공급수가 모듈 내 유로를 흐르는 흐름성과 흐르지 않는 사영역을 관측하였으며 정확한 분석을 위하여 전산 유체역학 프로그램을 이용하여 비교 분석을 하여 성능을 알아보았다.

2. 실험

2.1. 공정구성 및 장치

본 실험에서 사용된 공정의 모식도는 Fig. 1과 같다. 직선 배열로 1개의 유입구와 1개의 유출구로 이루어져 있는 직사각형 아크릴 모듈에 Masterflex사의 model 7519-05 연동펌프를 이용하여 일정한 유량으로 모듈에 공급수를 공급시켜주었으며 반대편의 유출구로 배출수가 나오도록 하였다. 공정 모듈의 구성은 두 개의 직사각형 아크릴판 사이에 1 mm의 두께를 지니는 실리콘 유로를 넣어 실험을 진행하였다. 실험 모듈의 모식도는 Fig. 2에 나타내었다. 실험 조건은 유속을 선정해 10, 20, 30 mL/min의 유속에서 공급수 용액의 흐름 및 유로 내부에 공급수가 흐르지 않는 사영역을 관측하였다.

2.2. 모듈 내 유체 흐름 분석을 위한 공급수 제조

본 실험에서 유로 내부를 지나는 공급수의 흐름을 효율적으로 관측하기 위하여 염기성을 나타내는 수산화나트륨 (NaOH)용액에 페놀프탈레인 (phenolphthalein 98.0%)용액을 소량 첨가하여 공급수를 제조하였다. 제

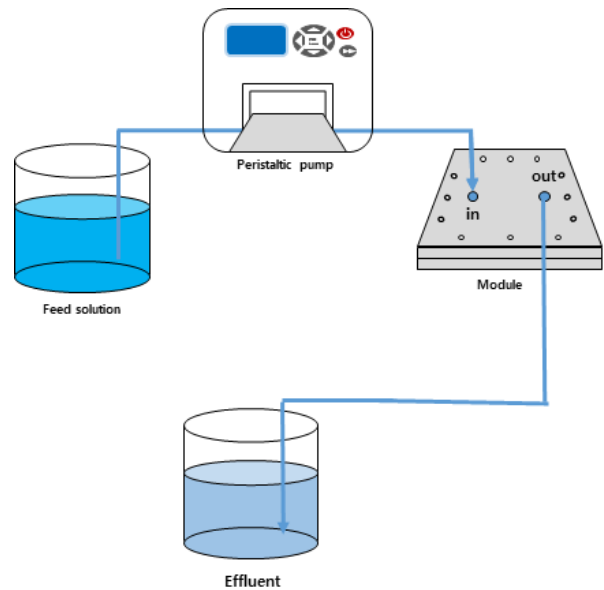


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

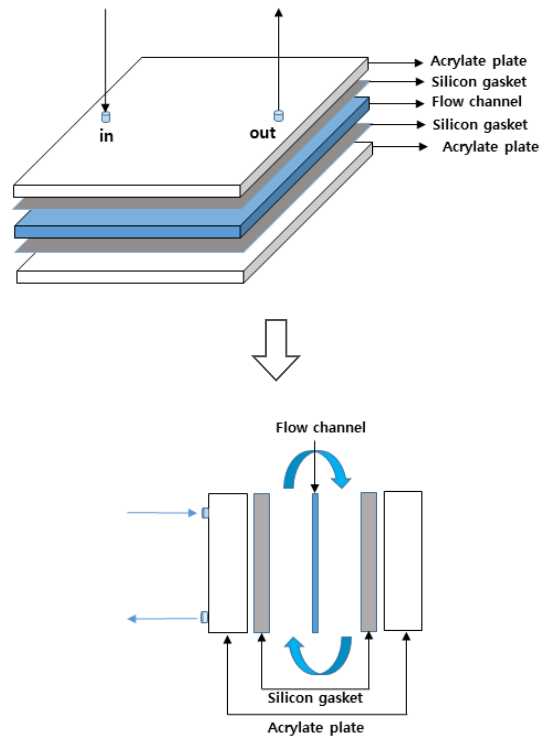


Fig. 2. Configuration of the CDI cell.

조 방식은 1 L 비커에 수산화나트륨 (NaOH)용액 2 g 을 넣고 증류수를 0.5 L의 양을 부어주었다. 원활한 수산화나트륨 용액의 용해를 위하여 해당 용액 속에 마그네틱 자석을 넣고 교반기(Daihan사 MSH-20A)를 이용

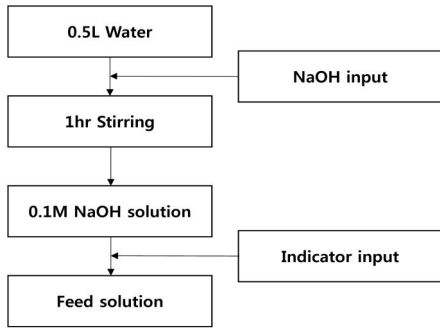


Fig. 3. Preparation of feed solution.

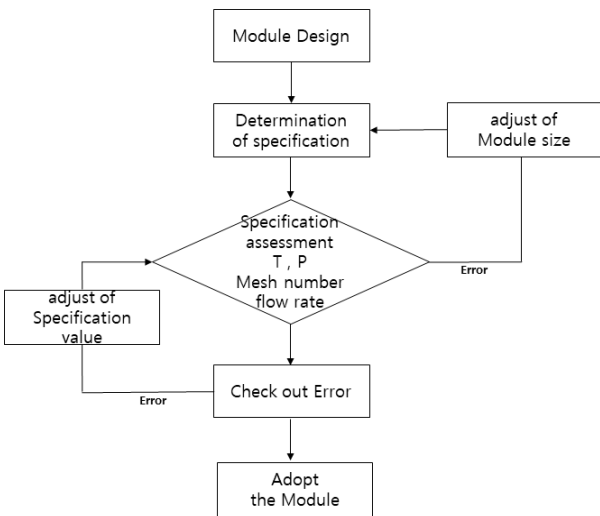


Fig. 4. Algorithm of CFD program.

하여 1 hr 동안 충분히 교반을 시킨 후 페놀프탈레인 (phenolphthalein 98.0%)을 소량 첨가하여 공급수를 제조하였다. 공급수 제조에 필요한 수산화나트륨은 OCI Company사의 제품을 사용하였으며, 페놀프탈레인은 98.0% (Samchun Chemicals), 증류수는 영린 초 순수 제조장치(한국)로 생산된 초순수를 사용하였다. 공급수 용액 제조의 순서는 Fig. 3에 표시하였다.

2.3. 셀 배열 및 유로 모형

아크릴판으로 이루어진 전체 셀의 모양은 직사각형 형태를 사용하였으며 전체 면적은 30 × 15 cm²로 구성하였다. 유출구와 유입구는 직선 형태의 방향으로 배열하였다. 실리콘으로 이루어진 두께 1 mm의 직사각형 유로 모양은 공급수가 유입구를 통해 유입될 때 고른 형태의 유체 흐름인 층흐름 형상을 유도하기 위하여 가로로 길고 유입구로부터 너비가 점점 넓어지는 형태로 설

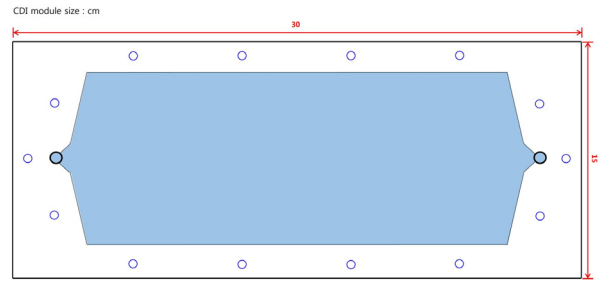


Fig. 5. The designed module used in this study.

계하였다. 본 실험에서 설계한 모듈의 형태는 Fig. 5에 나타내었다.

2.4. 시뮬레이션 도구

본 실험에서 유로 내 각 지점의 공급수 흐름의 특성을 자세하게 확인하기 위해 전산 유체 역학 (computational fluid dynamics, CFD)을 이용하였다. 전산 유체 역학은 유체의 흐름을 파악하는데 있어 가장 널리 쓰이는 프로그램으로서 현재 전 세계적으로 ANSYS CFX와 ANSYS Fluent가 쓰이고 있다. 본 실험에서 사용된 프로그램은 Ansys CFX 버전 R 19.2이며 k-epsilon (k-ε) 난류모델을 도입하여 실험을 진행하였다. 해당 프로그램에서 유체 흐름의 난류특성을 나타내기 위해 두 수송방정식 (1)과 (2)를 이용하여 진행하였다. 해당 식에서 난류에너지의 대류와 확산이 유체의 흐름에 미치는 영향을 파악할 수 있는데, 이 두 개의 식은 각각 수송변수인 난류 운동에너지(k)와 난류 소실율(ε)에 대한 식으로서 k는 난류 내의 운동에너지를 결정하는 척도이고 ε는 난류의 크기를 결정하는 변수로 쓰인다. 두 개의 수송방정식은 (1), (2)식과 같이 정의된다[15,16].

$$\frac{\alpha}{\alpha t} (\rho k) + \frac{\alpha}{\alpha x_i} (\rho k u_i) = \frac{\alpha}{\alpha x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\rho_k} \right) \frac{\alpha k}{\alpha x_i} \right] + P_K + P_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \tag{1}$$

$$\frac{\alpha}{\alpha t} (\rho \epsilon) + \frac{\alpha}{\alpha x_i} (\rho \epsilon u_i) = \frac{\alpha}{\alpha x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\alpha \epsilon}{\alpha x_i} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (P_k + C_{3\epsilon} P_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \tag{2}$$

해당 식에서 α는 편미분 계수, t는 시간, μ는 분자의 점성계수, ρ는 밀도, u는 난류 흐름 내의 변동 속도요

소를 나타내고 P_k 는 난류 운동에너지의 생산량, P_b 는 부력을 나타내며 (3)~(5)식에 의해 계산되어진다. 그 외의 변수들을 상수로 각각 $C_{1\epsilon} = 1.44$, $C_{2\epsilon} = 1.92$, $C_{3\epsilon} = -0.33$, $C_\mu = 0.09$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\epsilon = 1.3$ 의 값을 가진다고 정의하였다[16].

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (3)$$

$$P_k = -\overline{\rho u_i u_j} \frac{\alpha u_i}{\alpha x_i} \quad (4)$$

$$P_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\alpha T}{\alpha x_i} \quad (5)$$

그 외 실험조건으로는 mesh에 대하여 element를 100만개 기준으로 수행하였고 skewness (편포도)를 확인하여 0.9 이하의 조건에서 계산을 수행하였다. 완전발달 유동이 아닌 경우에는 점성에 의해 경계층이 발생하게 되는데 이러한 이유로 내부 유동장의 벽면에는 wall condition (비 침투조건)을 설정하였다. 오차 허용범위인 residual target은 0.00001로 하고 Inlet은 유량 설정에 따라 달리 하였으며 outlet은 대기압 조건으로 설정하여 분석을 수행하였다. CFD 프로그램에 대한 알고리즘은 Fig. 4에 나열하였다.

2.5. CFD 분석 방식

본 실험에서 설계한 모듈은 Fig. 5와 같다. 전극 사이의 유로의 두께는 1 mm로 설정을 하였으며 10, 20, 30 mL/min 각기 다른 유속 조건에서 분석을 수행하였으며 이를 통하여 유로 내 유속별로 셀 내부에 가해지는 내부 압력분포, 속도 분포, 내부의 사영역을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 유속에 따른 유체 흐름 관측

본 실험에서는 연동펌프 장치를 통해 모듈로 공급되는 공급수가 유로 내부를 흐를 때 고른 모양의 흐름을 형성하게 하도록 Fig. 5에 명시된 모듈을 통해 실험을 진행하였다. 실험에서 진행한 요소는 Fig. 2와 같은 모듈 조건에서 분석을 수행하였으며 유속은 10, 20, 30

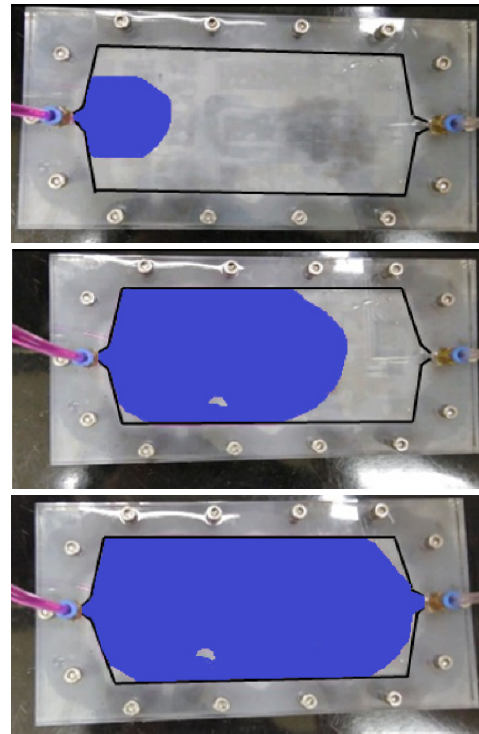


Fig. 6. The confirmation of the flow pattern and dead zone at the flow rate of 10 mL/min.

mL/min의 각기 다른 조건에서 진행하였다. 실험 방식은 공급수가 유로 내부에 공급될 때 형성하는 흐름의 모양 관측과 유로 내부를 지나는 과정에서 유로의 각 지점에 생기는 사영역을 확인하였다. 각기 다른 유속 10, 20, 30 mL/min에서 관측한 자료는 다음 Fig. 6~8에 나열하였다. 유로 내부를 지나는 공급수는 유속에 상관없이 일정한 고른 형태의 흐름을 보였고 공급수가 모듈 내를 흘러간 후의 각 유로 내 지점에 흐르지 않는 사영역의 영역은 유입구, 유출구 부분에서 위, 아래 모서리 부분에 약간 발생하였으나 유속이 증가할수록 이러한 경향이 감소되는 것을 확인하였다.

3.2. CFD 유동해석방법을 통한 분석

3.2.1. 유속에 따른 내부 압력 분포

Fig. 9는 CFD를 통해 유속 10, 20, 30 mL/min에 조건에서 연동펌프 장치를 통해 공급되는 공급수에 따른 내부 압력분포를 측정된 결과이다. 실험에서 사용한 모듈의 유입구, 유출구는 앞서 Fig. 2에 명시했듯이 직선 방향으로 배열하였다. 일반적인 사실로서 내부 압력은 유체의 유량이 증가함에 따라 증가하며 압력분포가 일

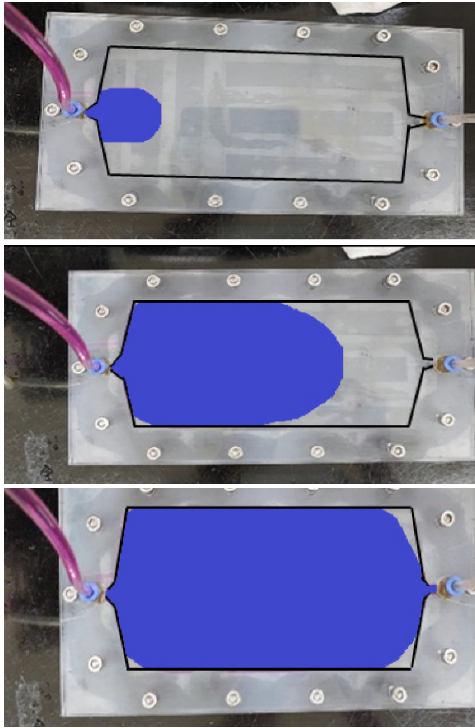


Fig. 7. The confirmation of the flow pattern and dead zone at the flow rate of 20 mL/min.

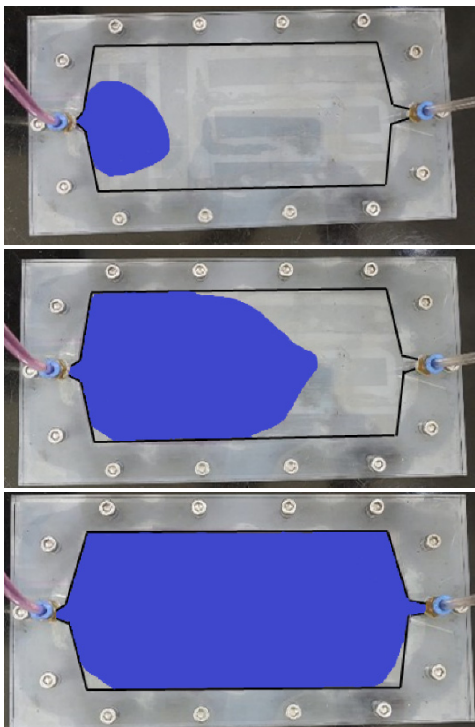


Fig. 8. The confirmation of the flow pattern and dead zone at the flow rate of 30 mL/min.

정하게 감소할수록 일정한 흐름을 나타낸다.

이를 통해 Fig. 5에 명시한 모듈의 특성을 분석한 결과 모든 유속 조건에서 공급수가 공급되는 유입구에서는 높은 압력분포를 보이다가 점차 공급수가 유로 내부를 흐를 때는 내부 압력분포가 일정하게 감소하여지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 공급수가 급격한 압력분포 없이 일정한 압력 감소 분포를 지니어 유로 내 사영역이 적음을 의미한다.

3.2.2. 유속에 따른 유선 경향성

Fig. 10은 유속 10, 20, 30 mL/min의 조건에서 모듈 내 유로의 각 지점을 지나는 공급수의 속도와 유선을 나타낸 결과이다. 유속 30 mL/min 조건에서는 10, 20 mL/min의 유속 조건에서 측정할 때보다 가운데 방향으로 속도가 조금 더 치우쳐 있는 부분을 보였지만 대부분 모든 유속 10, 20, 30 mL/min에서 전체적인 내부 유로 각 지점의 속도 분포는 비슷한 현상을 띠는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 10은 내부 유로의 각 지점의 유체의 흐름을 실선으로 이은 유선분석을 보여주는 자료이기도 하다. 이러한 자료는 모듈 내의 유로 지점 부분에서 공급수가 흐르지 않는 사영역의 유무를 가장 잘 확인할 수 있는 척도이기도 하다. 이를 통해 유속 10, 20, 30 mL/min의 조건에서 유선을 분석하여 사영역의 유무를 확인할 수 있었다. 마찬가지로 모듈의 유입구와 유출구는 직선 방향으로 설정하여 흐름을 유도했다. 10 mL/min의 유속 조건에서는 유출구와 유입구 위, 아래 방향의 각 모서리 부분이 약간의 사영역이 발견되었으나 유속이 20, 30 mL/min로 증가할수록 각 모서리 부분의 사영역이 상당히 줄어들었음을 확인하였다. 이를 통하여 모든 유속 10, 20, 30 mL/min의 조건에서 유로 내 공급수의 속도 분포가 비슷한 양상을 띠며 사영역의 부분 또한 유속이 증가할수록 줄어드는 것을 확인할 수 있었다.

3.2.3. 유속에 따른 속도 벡터

Fig. 11은 10, 20, 30 mL/min에 대한 속도 벡터의 결과이다. 속도 벡터를 살펴보면 10, 20, 30 mL/min의 유속에서 속도 벡터분포가 모두 비슷한 모양을 나타냈다. 또한 처음 공급수가 실험 모듈에 공급됐을 때 빠른 속도로 고른 형태의 유체 흐름을 형성한 후에 일정한 속도 분포로 유로를 빈틈없이 지나는 것을 분석할 수 있었으며 공급수가 유출구를 통해 빠져나가는 부분에서

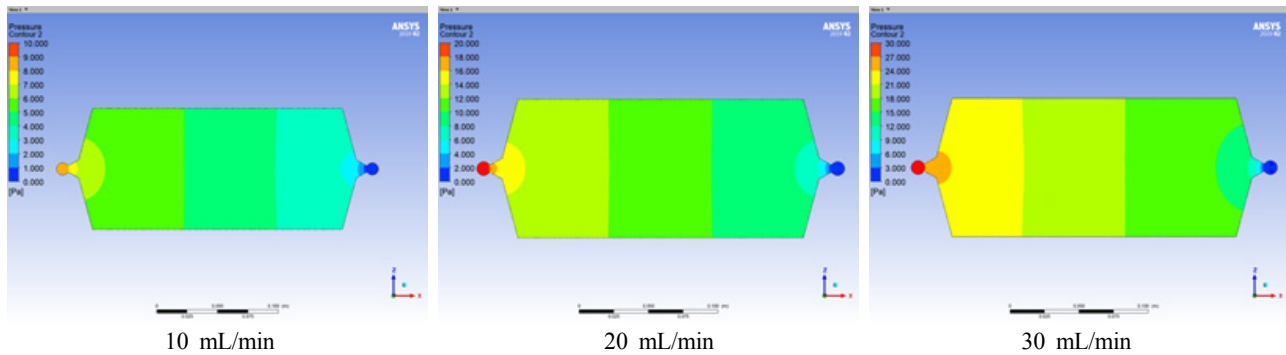


Fig. 9. The distribution of the internal pressure at the flow rate range of 10 to 30 mL/min.

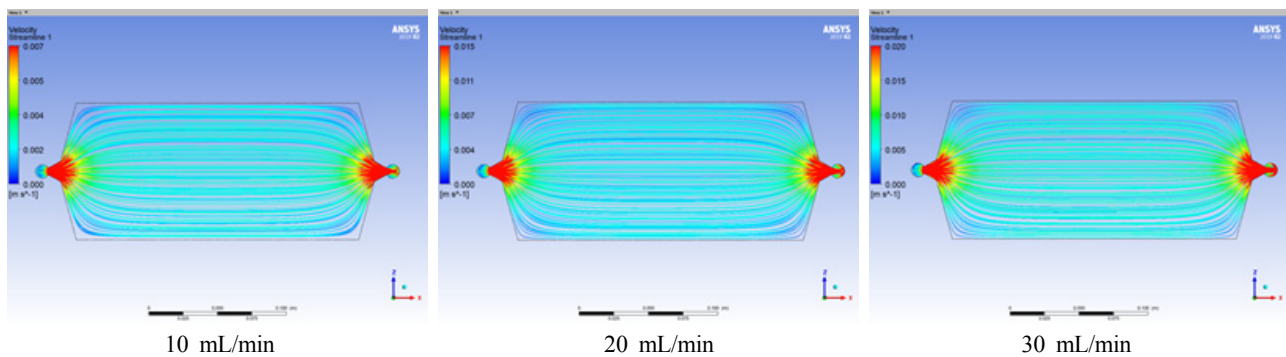


Fig. 10. The distribution of the streaming line at the flow rate range of 10 to 30 mL/min.

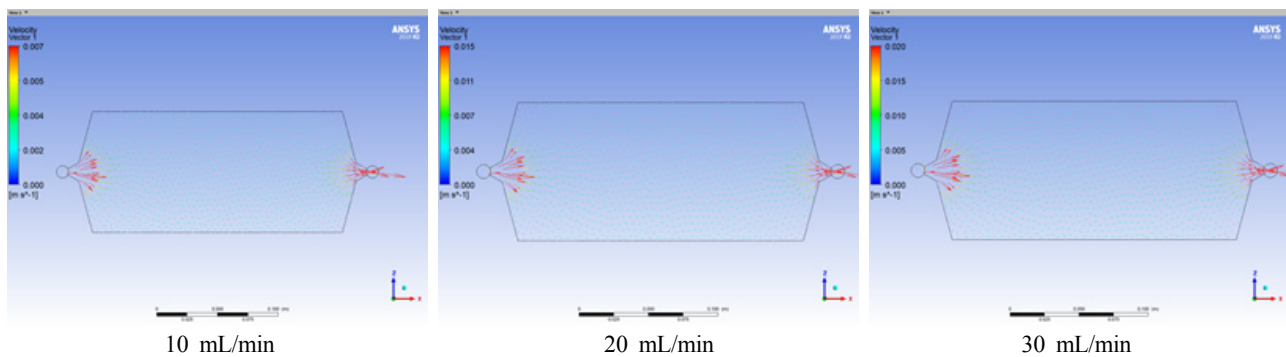


Fig. 11. The distribution of the velocity vector at the flow rate range of 10 to 30 mL/min.

는 다시 가운데 방향으로 속도 벡터가 빨라지는 경향을 확인할 수 있었다. 유로 내부의 속도 벡터가 고르게 분포하는 현상은 앞서 유선 분석에서 나타난 결과처럼 유로 내 사영역의 분포가 거의 없다는 것으로 판명되고 본 실험에서 설계한 유로를 사용 시 모든 유속 10, 20, 30 mL/min의 조건에서 공급수가 고른 흐름의 모양으로 유로를 빈틈없이 통과하는 것을 의미한다.

3.2.4. CFD 프로그램과 실제 실험 관측 비교 분석

본 실험에서는 실제 Fig. 1, 2에 명시한 실험 공정 조건과 모듈을 대상으로 본 연구에서 설계한 Fig. 5의 유로를 이용하여 유로 내 공급되는 공급수의 흐름성과 사영역의 유무를 관측하였으며 상세한 비교 분석을 위하여 CFD 전산 유체 역학을 이용하여 분석 및 비교하였다. CFD 전산 유체 역학을 통해 분석된 내부 압력분포에서는 유속 10, 20, 30 mL/min의 조건에서 모두 압력 분포가 급격한 감소가 아닌 일정한 비율로 감소하여지

는 것을 확인할 수 있었으며 사영역을 자세히 관측할 수 있는 유선 분석에서도 사영역의 발생 여부가 10 mL/min 유속 하에서는 유출구 모서리의 지점에서 약간의 사영역이 보였으나 유속이 증가할수록 이러한 현상은 줄어들어 가는 것을 확인할 수 있었다. 내부 속도 벡터 분포에서도 공급수가 유입될 때 빠른 속도로 고른 형태의 흐름을 형성 후 일정한 속도로 유로를 지나 다시 속도가 증가하여 유출구로 나가는 현상을 확인할 수 있었다. 앞서 명시한 CFD 분석 결과 자료를 토대로 실제 실험에서 관측한 Fig. 6~8의 자료를 비교 분석한 결과 실제 실험 공정에서 공급수를 모듈 내부에 공급하여 유로 내부의 흐름을 관측하였을 때 유속 10, 20, 30 mL/min의 조건에서 CFD 분석과 마찬가지로 고른 형태의 흐름을 형성하여 일정한 속도로 유로를 지나가는 것을 확인할 수 있었으나 10 mL/min의 유속에서는 유출구 방향의 위, 아래 모서리 지점에서 약간의 사영역이 발생함을 확인하였고 유속이 20, 30 mL/min으로 증가할수록 사영역이 줄어드는 현상을 관측할 수 있었다. 위의 내용을 토대로 CFD 프로그램 분석과 실제 공급수의 흐름을 비교 분석한 결과 Fig. 5의 명시된 유로를 사용할 시 공급수가 고른 형태 흐름으로 내부 유로를 지나며 유로 내 사영역의 발생이 거의 나타나지 않음을 의미한다. 따라서 본 실험에서 설계한 유로는 다양한 유속 조건에서 대면적을 가지는 CDI의 모듈에 적합하다고 생각한다.

4. 결 론

본 연구에서는 다양한 유속 조건으로 대면적을 지나는 CDI 공정에 적합한 유로의 모델링 설계 연구를 수행하였다. 정확한 유체의 흐름을 분석하기 위하여 CFD 프로그램 분석과 실제 유체의 흐름성 관측을 통해 각 유속 10, 20, 30 mL/min의 조건에서 모듈 내 공급수의 흐름성과 사영역의 발생을 확인하였다. 두 개의 결과를 서로 비교 분석하였을 때 모든 조건에서 공급수가 고른 형태의 흐름을 형성한 후 일정한 속도로 유로의 면적을 통과하는 것을 확인할 수 있었고 사영역의 발생 또한 유속이 증가할수록 점점 감소하는 것을 보였다. 이를 전산 유체 역학 프로그램인 CFD를 통해 자세히 분석한 결과 유로 내 압력분포는 일정하게 감소하였으며 사영역을 제일 잘 분석할 수 있는 유선 부분에서 유속이 증가할수록 유로 내 사영역이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 내부 속도 벡터를 통해 모든 유속 조건에

서 공급수는 고른 형태의 흐름을 유지하면서 유로면적을 지나는 것을 확인하였다. 이와 같은 내용을 바탕으로 추후 대면적을 지나는 CDI 모듈에 이번 실험에서 설계한 유로를 적용 시 공급수가 일정한 모양의 흐름성과 적은 사영역의 경향을 지니게 되어 탈염 효율이 증가할 것으로 판단된다.

감 사

본 연구는 환경부 “글로벌탑 환경기술개발사업”으로 지원받은 과제임(과제번호: 2016002200001).

Reference

1. J. Ma, C. He, D. He, C. Zhang, and T. D. Waite, “Analysis of capacitive and electro-dialytic contributions to water desalination by flow-electrode CDI”, *Water Res.*, **144**, 296 (2018).
2. W. S. Yun, S. I. Cheong, and J. W. Rhim, “Effect of ion exchange capacity on salt removal rate in membrane capacitive deionization process”, *Membr. J.*, **28**, 332 (2018).
3. C. Zhang, D. He, J. Ma, W. Tang, and T. D. Waite, “Faradaic in capacitive deionization (CDI): A review”, *Water Res.*, **128**, 314 (2018).
4. G. L. Andres, T. Mizugami, and Y. Yoshihara, “Simulation of an electric behavior of the CDI system”, *Desalination*, **419**, 211 (2017).
5. L. Chang, J. Lia, X. Duana, and W. Liua, “Porous carbon derived from metal-organic framework (MOF) for capacitive deionization electrode”, *Electrochim Acta*, **176**, 956 (2015).
6. Y. J. Song, W. S. Yun, and J. W. Rhim, “Studies of performance and enlarged capacity through multi-stages stacked module in membrane capacitive deionization process”, *Membr. J.*, **27**, 449 (2017).
7. B. G. Jeon, H. C. NO, and J. I. Lee, “Development of a two-dimensional coupled-implicit numerical tool for the optimal design of CDI electrodes”, *Desalination*, **274**, 226 (2011).
8. C. Wang, L. Chen, S. Liu, and L. Zhu, “Nitrite desorption from activated carbon fiber during ca-

- capacitive deionization (CDI) and membrane capacitive deionization (MCDI)”, *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.*, **559**, 392 (2018).
9. C. O. Park, J. S. Oh, and J. W. Rhim, “Preparation of carbon electrodes using activated carbon fibers and their performance characterization for capacitive deionization process”, *Membr. J.*, **28**, 272 (2018).
 10. Z. Chen, H. Zhang, C. Wu, Li. Luo, C. Wang, S. Huang, and H. Xu, “A study of the effect of carbon characteristics on capacitive deionization (CDI) performance”, *Desalination*, **433**, 68 (2018).
 11. R. L. Zornitta and L. A. M. Ruotolo, “Simultaneous analysis of electrosorption capacity and kinetics for CDI desalination using different electrode configurations”, *Chem. Eng. J.*, **332**, 33 (2018).
 12. Y. Oren, “Capacitive deionization (CDI) for desalination and water treatment - Past, present and future (a review)”, *Desalination*, **228**, 10 (2008)
 13. K. Laxman, A. Husain, A. Nasser, M. A. Abri, and J. Dutta, “Tailoring the pressure drop and fluid distribution of a capacitive deionization device”, *Desalination*, **449**, 111 (2019).
 14. M. E. Suss, S. Porada, X. sun, P. M. Biesheuvel, J. Yoon, and V. Presser, “Water desalination via capacitive deionization: What is it and what can we expect from it?”, *Energy Environ. Sci.*, **8**, 2296 (2015).
 15. J. Sodja, “Turbulence models in CFD”, University of Ljubljana (2007).
 16. W. P. Jones and E. Launder, “The prediction of laminarization with a two-equation model of turbulence”, *Int. J. Heat Mass Transf.*, **15**, 301 (1972).