

수치해석을 이용한 해수이차전지 주변의 유동장 연구

최진혁* · 송지수*† · 이성욱* · 강동훈**

Study on the Flowfield Around Seawater Secondary Battery Module Using Numerical Simulation

Jinhyeok Choi*, Gisu Song*†, Sungwook Lee*, Donghoon Kang**

Key Words : Seawater secondary battery module(해수이차전지), Wake(후류), Gap(간격), Flow velocity(유속), CFD(전산유체역학)

ABSTRACT

Seawater secondary battery, one of the next-generation secondary batteries, is an eco-friendly technology, and various applications have been suggested. In particular, since the seawater secondary battery is exposed to sea water, the performance of that is naturally affected by the surrounding flow field. In this paper, a study for main parameters that can affect the performance of a secondary battery was conducted based on the numerical simulation. Namely, it was examined how the characteristics of the flow field change with respect to these parameters which are gap between secondary battery or inflow velocities. And the results of this study would be applied as reference data for optimal arrangement of secondary battery.

1. 서론

해수이차전지는 폭발 위험성을 가지고 있는 기존의 리튬 전지와는 다르게 해수의 나트륨(Na^+)이온을 이용하여 전기를 충전하거나 사용하는, 안전하면서 친환경적인 에너지 저장 장치(ESS, Energy Storage System)이다. 지구 표면의 약 70%를 차지하는 바다를 이용할 수 있기 때문에 그 활용성은 다양하며 많은 관심을 받고 있는 차세대 이차전지이다. 해수 속의 나트륨을 원료로 사용하기 때문에 리튬 전지에 비해 수명이 길고, 비용적인 측면에서도 유리하다. 이러한 장점을 바탕으로 최근 해수이차전지에 대해 많은 연구가 시작되는 단계이다. 특히 비상용 부이(Buoy)에 장착되면, 해수이차전지로부터 생성되는 전기를 통해 조난 시에도 지속적인 통신, GPS 위치 송/수신 등이 가능하다. 대표적인 선행연구로는 Kim 등이 수행한 해수이차전지 모듈의 설계와 개발에 관한 연구가 있으며 기본적인 성능 및 작동 원리 등이 상세히 언급되어 있다.⁽¹⁾ 또한 대규모 정지형 에너지 저장을 위한 고속 및 역회수성 성능을 가진 해수이차전지에 관한 연구도

수행되었고,⁽²⁾ 전해질을 사용하여 해수를 처리하고, 전기 에너지를 얻는 동시에, 염분을 제거하고 정제된 물을 생산하는 이중 용도에 관한 연구⁽³⁾도 진행된 바 있다. 또한, 새로운 양극 재료를 제안하며 고에너지 밀도를 가지면서 재충전이 가능한 비금속 해수이차전지에 관한 연구⁽⁴⁾와 배터리의 전압, 온도, 냉각수 제어 등 해수이차전지 운용을 위한 알고리즘에 관한 연구⁽⁵⁾ 등도 수행되었다. 하지만 이전 연구들은 대부분 해수이차전지 자체의 성능개선이나 운용과 관련되어 있고 해수이차전지가 위치하는 환경과 관련된 연구는 수행된 사례는 없었다. 특히, 해수이차전지는 수중에 존재하는 조류나 해류, 수심에 따라 파랑의 영향을 받을 수 밖에 없으므로 해수이차전지의 주변 유동장에 대한 이해는 최적 설계나 배치 시 반드시 필요하다.

본 연구에서는 전산유체해석(CFD)방법론을 이용하여 다양한 조건에서 해수이차전지 주변의 유동장을 해석하고 비교하였다. 이를 통해 해수이차전지 주변의 유동장에 대한 이해도를 높이고 향후 해수이차전지 상용화에 활용되고자 하는 것이 본 연구에 목표이다.

* 한국해양대학교 조선해양시스템공학부(Division of Naval Architecture and Ocean Systems Engineering, National Korea Maritime & Ocean University)

** 경상국립대학교 조선해양공학과(Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Gyeongsang National University)

† 교신저자, E-mail : gisu.song@kmou.ac.kr

2023 한국유체기계학회 하계학술대회 발표 논문, 2023년 7월 5일~7월 7일, 평창 알펜시아

The KSFJ Journal of Fluid Machinery: Vol. 26, No. 6, December 2023, pp.57~68(Received 14 Jul. 2023; revised 28 Aug. 2023; accepted for publication 08 Oct. 2023)

한국유체기계학회 논문집: 제26권, 제6호, pp.57~78, 2023(논문접수일자: 2023.07.14, 논문수정일자: 2023.08.28, 심사완료일자: 2023.10.08)

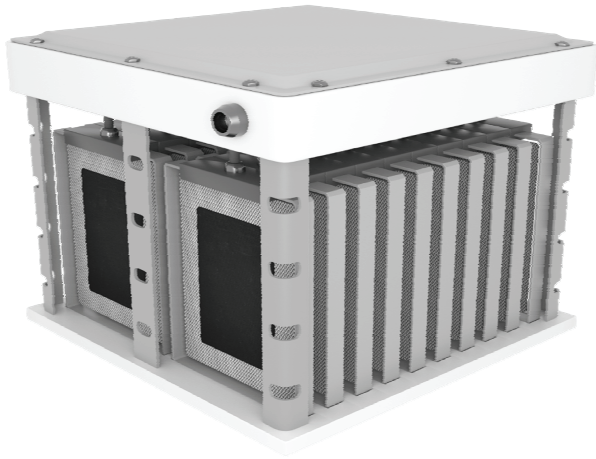


Fig. 1 Example of seawater secondary battery

2. 수치해석기법

2.1 수치해석 대상 정의

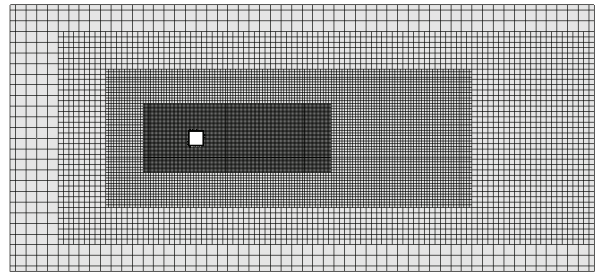
본 연구의 해석대상인 해수이차전지는 Fig. 1에 나타내었다. 날개의 해수이차전지를 셀이라고 정의하는데, 얇은 평판 형태로 구성된 해수이차전지 셀이 횡방향과 종방향으로 각각 나열되어 있다. 통상적으로 해수이차전지는 10개의 셀이 하나의 단으로 구성되어 있으며, 각 셀의 규격은 길이, 높이, 두께 순으로 $0.13\text{ m} \times 0.13\text{ m} \times 0.015\text{ m}$ 이다.

2.2 수치해석기법 검증

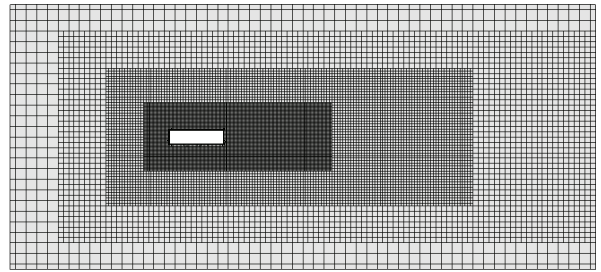
해수이차전지 주변의 유동장을 수치 모사하기에 앞서, 유사한 유체역학적 특성을 가지는 유동을 먼저 해석함으로써 실제 문제해석에 사용할 수치해석기법 등을 정의하고자 하였다. 앞서 언급한 바와 같이 해수이차전지 셀은 얇은 판 형태의 육면체이기 때문에 유동의 박리가 수반될 가능성이 높다고 판단하였다. 따라서 본 연구에서 정의한 벤치마크 유동은 Yu, Kareem이 연구한 종횡비가 1:1, 1:4인 2차원 직사각형 프리즘 주변의 유동장이다.^(6,7) 유동의 박리가 특징적인 본 유동은 다양한 수치해석결과와 시험결과가 알려져 있다.^(6,7) 본 유동의 수치해석은 유체해석용 상용코드인 STAR-CCM+

Table 1. Numerical detail

Code	STAR-CCM+ Ver. 15.06
Convection term	2 nd Upwind Scheme
Turbulent model	k- ω SST model Realizable k- ϵ model
Grid system	Unstructured
Wall treatment	Wall function ($Y_1^+ = 50$)
Total number of Grid	About 100,000



(a) Aspect ratio 1:1



(b) Aspect ratio 1:4

Fig. 2 Grid system for two geometries of prism

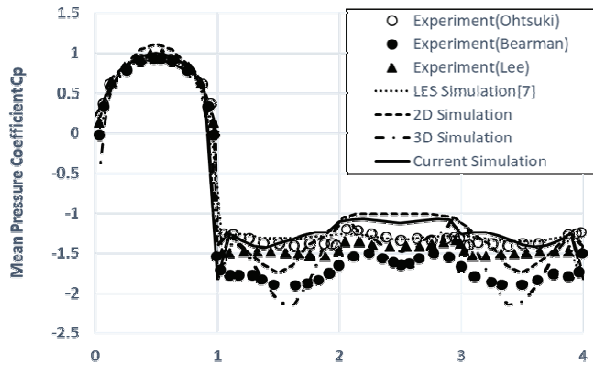
Ver. 15.06을 이용하여 수행되었으며, 2차원으로 해석을 진행하였다. 적용된 수치기법은 Table 1에 간략히 정리하였다. 특히, 2가지 난류모델을 적용, 결과를 비교함으로써 해수이차전지 해석 시 적절한 난류모델을 결정하는데 활용하고자 하였다. Fig. 2에는 앞서 언급한 2가지 프리즘 형상을 대상으로 구성된 격자계를 각각 도시하였다.

비정상 수치해석을 통해 두 가지 형상의 항력계수(C_D)와 평균 유동장 특징을 표현하는 표면의 압력계수분포(C_P), 후류의 비정상적인 특성을 나타내는 스트로할 수(Strouhal number)등을 비교하였다.

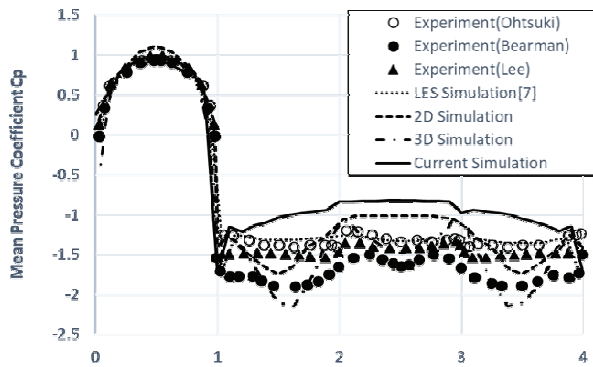
본 수치해석에서 프리즘의 높이를 기준으로 한 레이놀즈 수(Reynolds number)는 10^5 이다. 비정상 수치해석을 위한 시간간격은 참고문헌^(6,7)을 통해서 알려진 스트로할 수(Strouhal number)를 기준으로 유동의 진동 주기를 구하고 이를 바탕으로 정의하였다. 계산영역의 전방부 및 상/하부면, 측면에는 유입류(Velocity inlet) 경계조건을, 후방부에는 압력유출(Pressure outlet) 경계조건을 각각 부과하였다. 후류의 진동 주기를 기준으로 100주기에 해당하는 시간 동안 수치해석을 수행하였다. 해석 결과 중 시간 평균한 항력계수(C_D)를 Table 2에 나타내었고, k- ω SST 난류모델 결과는 CFD-1으로 Realizable k- ϵ 난류모델 결과는 CFD-2로 각각 명기하였다. 또한 종횡비가 1:1인 프리즘 표면의 평균 압력계수의 분포를 참고문헌^(6,7)의 결과와 함께 Fig. 3에 도시하였다.

Table 2 Comparison of C_D from present simulation and previous study

Aspect Ratio	1:1			
Method	LES ⁶	Exp. ⁶	CFD-1	CFD-2
C_D	2.01	-	2.07	1.77
Aspect Ratio	1:4			
Method	LES ⁶	Exp. ⁶	CFD-1	CFD-2
C_D	1.43	1.4	1.30	1.20



(a) $k - \omega$ SST model



(b) Realizable $k - \epsilon$ model

Fig. 3 Mean pressure coefficient distribution on 1:1 prism

Table 3 Comparison of St. number from present simulation and previous study

Aspect Ratio	1:1			
Method	LES ⁶	Exp. ⁶	CFD-1	CFD-2
Strouhal Num.	0.14	0.13	0.13	0.15
Aspect Ratio	1:4			
Method	LES ⁶	Exp. ⁶	CFD-1	CFD-2
Strouhal Num.	0.15	0.135	0.136	0.106

Table 2와 Fig. 3을 바탕으로, $k-\omega$ SST 난류모델의 수치 해석 결과가 Realizable $k-\epsilon$ 난류모델의 수치해석 결과에 비해 이전 연구자들의 연구결과⁽⁶⁾에 더 근접해 있음을 확인

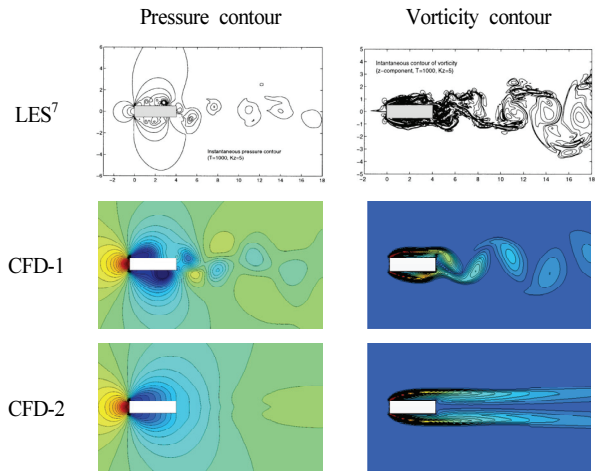


Fig. 4 Instantaneous pressure and vorticity contour on 1:4 prism with respect to two turbulent model

Table 4 Information of variation of simulation parameters

Item	Value			
Gap [m]	0.005	0.010	0.015	0.020
Inflow velocity [m/s]	0.5	1.0	1.5	2.0

할 수 있다. 또한 후류의 비정상적인 특징에 대하여 비교하고자 Table 3에는 후류의 스트로할 수(Strouhal number)를, Fig. 4에는 어느 한순간의 압력장 및 와도장을 2가지 난류모델 별로 비교하여 나타내었다.

비교 결과, 프리즘 후방 유동장의 비정상성도 $k-\omega$ SST 난류모델의 수치해석 결과가 Realizable $k-\epsilon$ 난류모델의 수치해석 결과에 비해, 보다 LES 및 시험 결과^(6,7)에 근접한 결과를 도출하고 있음을 확인할 수 있다. 이로부터, 본 연구에 적합한 난류모델과 적절한 격자계 등을 정의하였다.

3. 수치해석

3.1 수치해석 케이스 정의

앞서 언급한 바와 같이 해수이차전지는 복수개의 셀이 나열되는 형태임에도 불구하고, 셀 간의 간격 혹은 유속의 변화에 따른 연구가 수행된 바 없다. Table 4에 나타난 바와 같이 본 연구에서는 해수이차전지 주변 유동장을 비교, 분석하고자 해수이차전지 셀 사이의 간격과 유속을 각각 4조건씩 변화시키면서 총 16 경우의 수치해석을 수행하였다.

특히, 해수이차전지가 노출되는 해양 환경을 감안하여 유입 유속은 실제 조류나 해류의 유속 범위인 약 1Knots~4Knots로 가정하였고 이를 환산하여 0.5 m/s~2.0 m/s로 정의하였다. 해수이차전지 셀 간격은 조립 후 전체 해수이차전

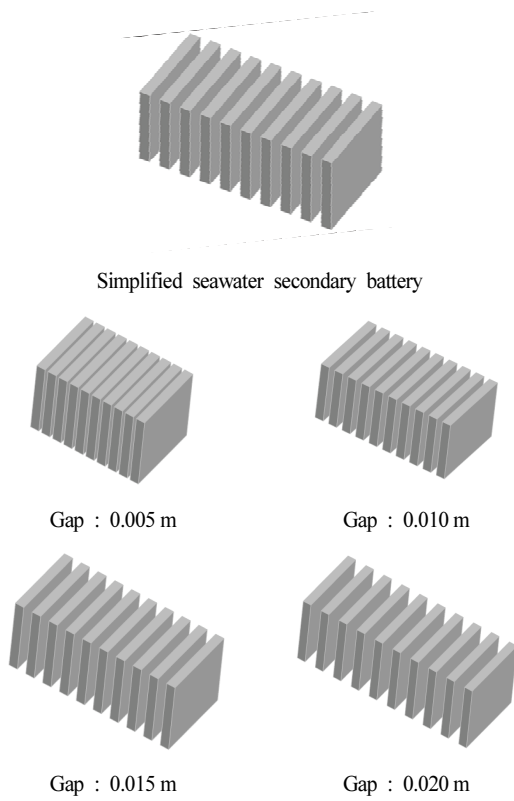


Fig. 5 Gap between seawater secondary battery cells

지의 폭을 고려하여 0.005 m~0.020 m로 결정하였다. Fig. 5에 도시한 바와 같이 10개의 셀이 하나의 단을 이루고 있으며 횡방향으로 나열되어 있고 해수이차전지 셀을 제외한 다른 구조물은 고려하지 않았다.

3.2 수치해석기법의 정의

해수이차전지 주변의 유동장해석 시 2장에서 수행된 수치해석을 토대로 기본적인 수치해석기법은 동일하게 적용하였고, 난류 모델은 $k - \omega$ SST 모델을 활용하였다. 앞서 언급한 바와 같이 해수이차전지 셀의 가로/세로 길이는 0.13 m로 정사각형의 형태이며, 기준길이 L로 정의하였다. 기준길이 및

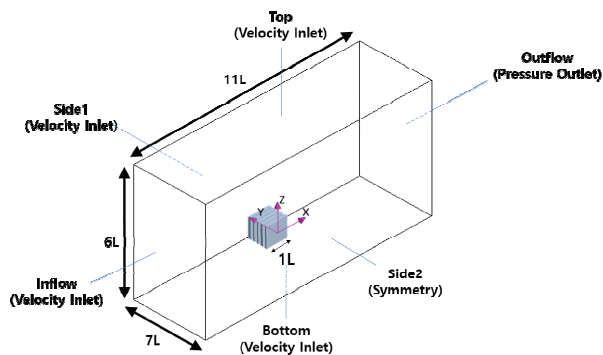


Fig. 6 Numerical domain and boundary condition

유속 1.0 m/s를 기준으로 한 레이놀즈 수 (Reynolds number)는 1.3×10^5 이다. 또한 해수이차전지의 형태가 좌우 대칭이므로 반쪽만 해석영역으로 설정하였다. 해석영역의 크기 및 경계조건은 Fig. 6에 나타내었다.

수치해석을 위한 격자계는 Fig. 7에 나타낸 바와 같이, 비정렬격자계로 구성되어 있다. 앞선 2장에서 해석한 벤치마크 문제에서 사용된 격자계와 동일하게 벽면에서 정의된 무차원 격자 크기(Y_1^+)는 50이고, 총 격자 개수는 약 370만 개다.

해수이차전지 셀 사이의 유동장을 분석하기 위한 목적으로 Fig. 8에 나타낸 것과 같이 총 30개의 지점을 정의하였다. Fig. 8 (a)는 측면에서 해수이차전지를 봤을 때 해수이차전지의 상부 및 중심부에 각각 5개 지점이 정의되어 있음을 나타내고, Fig. 8 (b)는 해수이차전지를 위에서 내려다봤을 때를 나타낸 것으로 중심부와 외곽부에 위치한 셀 사이의 유동장 특징을 분석하고자 3개 지점(A, B, C)로 정의하였다.

또한 해수이차전지 후방의 유동장을 분석하기 위한 목적으로 Fig. 9에 나타낸 것과 같이 총 30개의 지점을 정의하였다. 해수이차전지 셀 후방과 셀 사이에 유동이 흐르는 영역의 후방에 각각 5개씩 총 10개의 지점을 정의하였고, 해수이차전지의 중심을 기준으로 1.0L, 1.5L, 2.0L 거리에 위치시켰다. 이는 향후 복수 단의 해수이차전지가 종방향으로 나열될 경우 후방에 위치한 해수이차전지로 유입되는 유속 등의 유동 정보를 얻기 위한 목적으로 고려되었다.

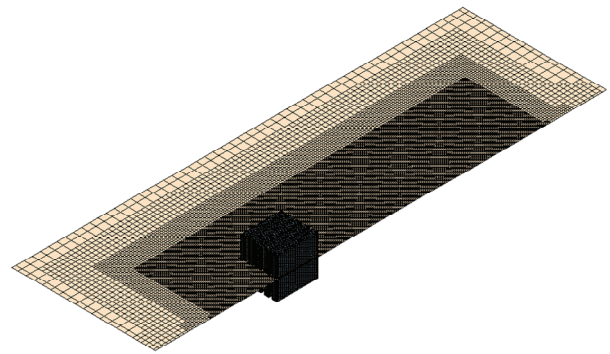


Fig. 7 Grid system

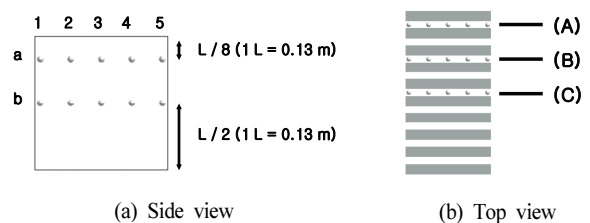


Fig. 8 Definition of monitoring points between seawater secondary battery cells

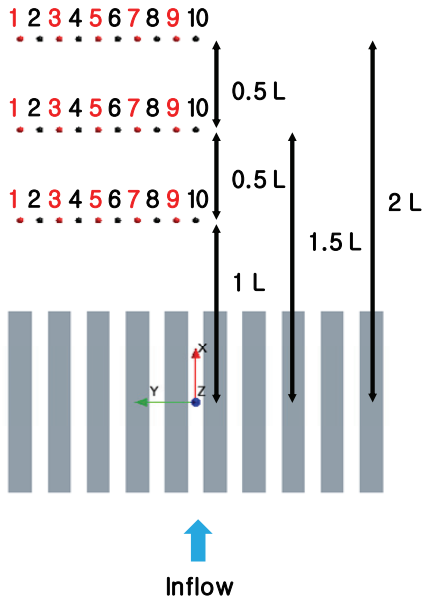
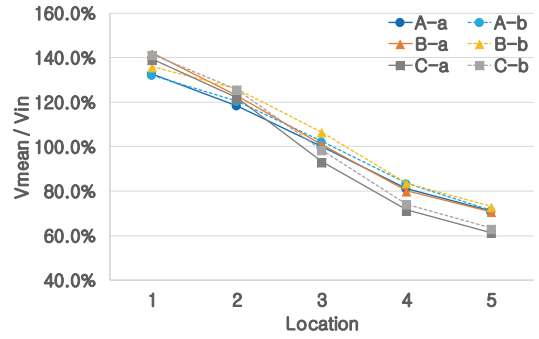


Fig. 9 Definition of monitoring points behind seawater secondary battery

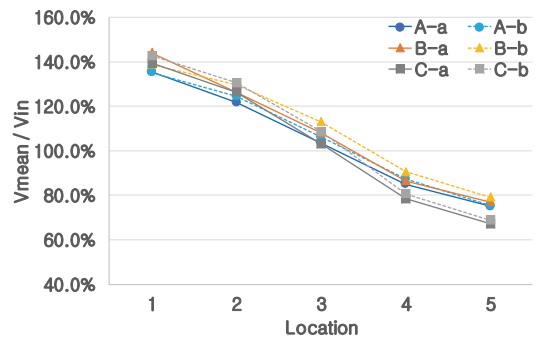
4. 수치해석 결과

4.1 해수이차전지 셀 사이의 내부 유속 비교

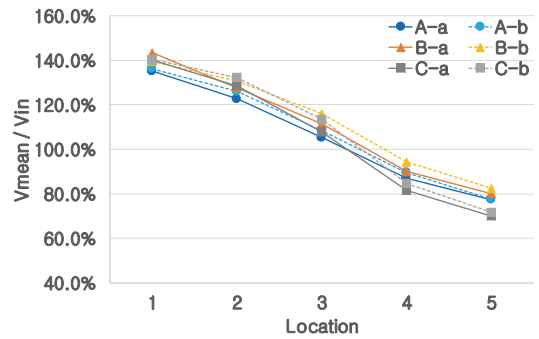
Fig. 10에는 셀의 내부에 위치하는 지점에서 측정한 X 방향의 유속분포를 해수이차전지 셀 간 간격으로 구분하여 나타내었다. Fig. 10에 표기되어있는 V_{mean} 은 평균유동장의 유속, V_{in} 은 유입류의 유속이다. V_{mean}/V_{in} 은 평균유동장의 유속을 유입류의 유속으로 나누어 무차원화한 것을 의미한다. 해수이차전지 셀 사이 평균 유속의 분포는 유입유속보다 간격의 영향이 큰 것을 알 수 있다. 즉, 해수이차전지 셀 사이의 간격이 0.005 m인 경우에는 셀 후방으로 갈수록 내부유동의 속도는 유입류 속도 대비 70~80% 수준으로 감소하였다. 반면, 간격이 점차 넓어지게 되면 내부유속은 감소되지 않고 대체로 유입류 대비 증가되는 경향을 보였다. 그리고 해수이차전지 셀 사이의 간격이 0.010 m인 경우에는 가장 외곽에 위치한 셀의 내부 영역에서 유속의 저하가 큰 것으로 나타났다. 이런 경향은 해수이차전지 셀 사이의 간격이 0.015 m인 경우에도 동일하였다. 간격이 가장 넓었던 0.020 m의 경우에는 B-a라인에서의 유속이 가장 느리게 예측되었으며, 전체적으로는 유입류보다 증가된 유속이 계속되었다. 이를 통해 해수이차전지의 셀 내부의 유속은 셀 내부의 위치마다 다르기도 하며, 서로 다른 유속으로 인해 셀 내부의 위치에 따른 유속 또한 달라질 수 있다. Fig. 11에는 유입 유속이 1.0 m/s일 때 Fig. 8에서 정의한 면에서 산출된 흐름방향(X축 방향)의 무차원화된 유속 등고선을 나타내었다. 이를 통해 동일 유속에서 간격의 변화에 따라 셀과 셀 사



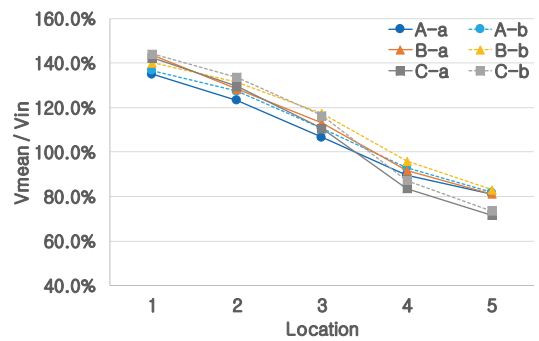
유입류 속도(V_{in}): 0.5 m/s



유입류 속도(V_{in}): 1.0 m/s



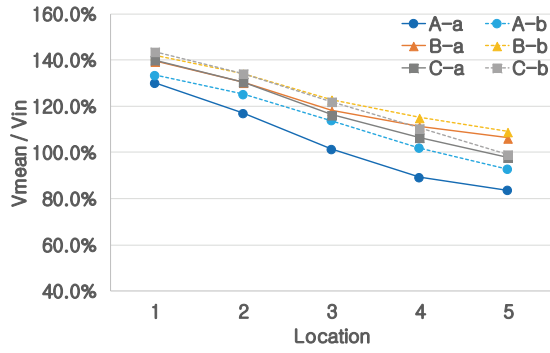
유입류 속도(V_{in}): 1.5 m/s



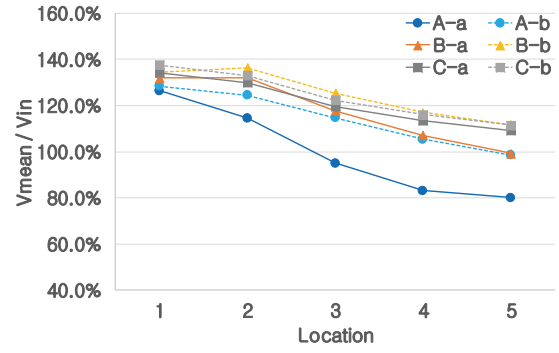
유입류 속도(V_{in}): 2.0 m/s

(a) Gap: 0.005 m

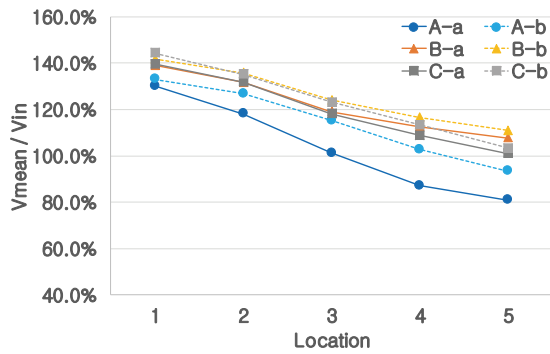
이의 유속 분포 특징 및 셀의 중심부와 가장자리 부분에서의 특징이 셀 간격에 따라 차이를 보임을 알 수 있다.



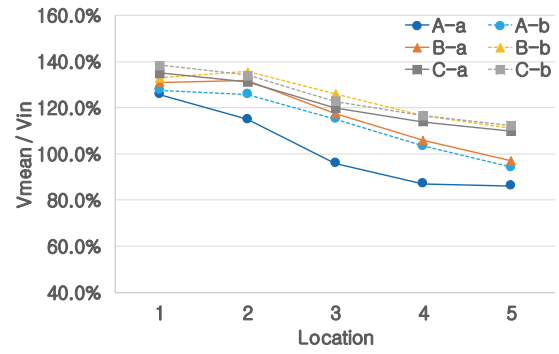
유입류 속도(V_{in}): 0.5 m/s



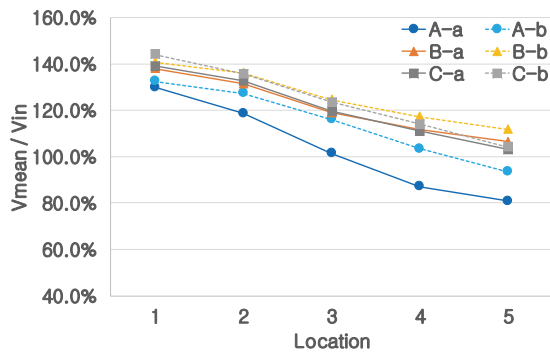
유입류 속도(V_{in}): 0.5 m/s



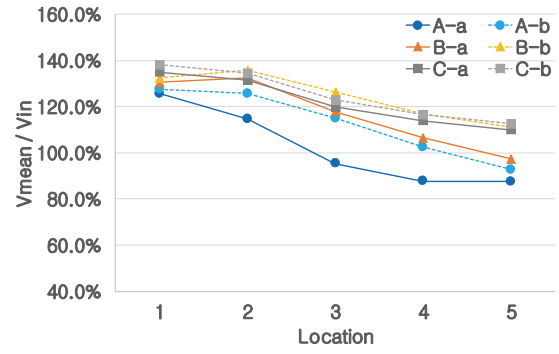
유입류 속도(V_{in}): 1.0 m/s



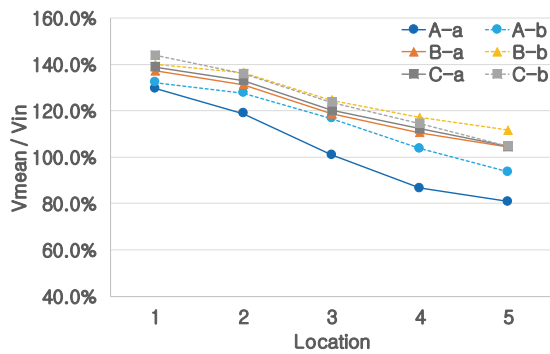
유입류 속도(V_{in}): 1.0 m/s



유입류 속도(V_{in}): 1.5 m/s

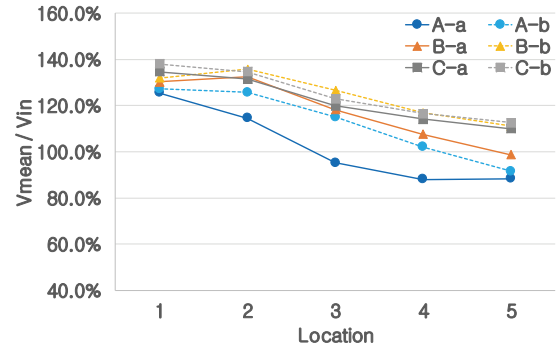


유입류 속도(V_{in}): 1.5 m/s



유입류 속도(V_{in}): 2.0 m/s

(b) Gap: 0.010 m



유입류 속도(V_{in}): 2.0 m/s

(c) Gap: 0.015 m

수치해석을 이용한 해수이차전지 주변의 유동장 연구

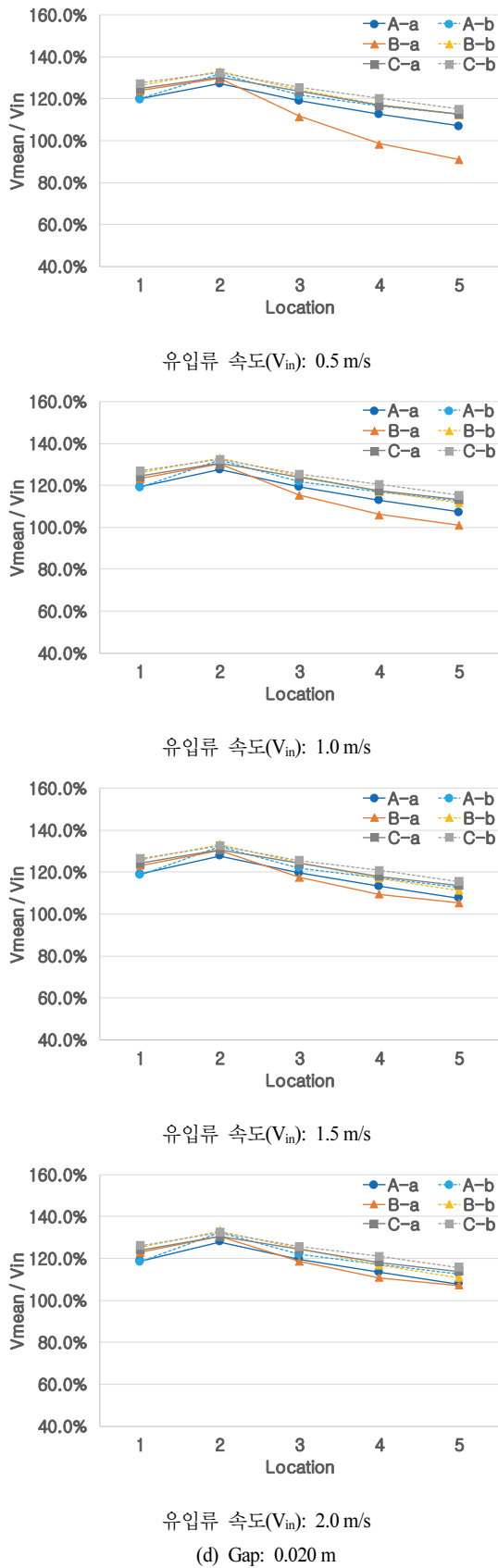


Fig. 10 Flow rate inside of seawater secondary battery with gap

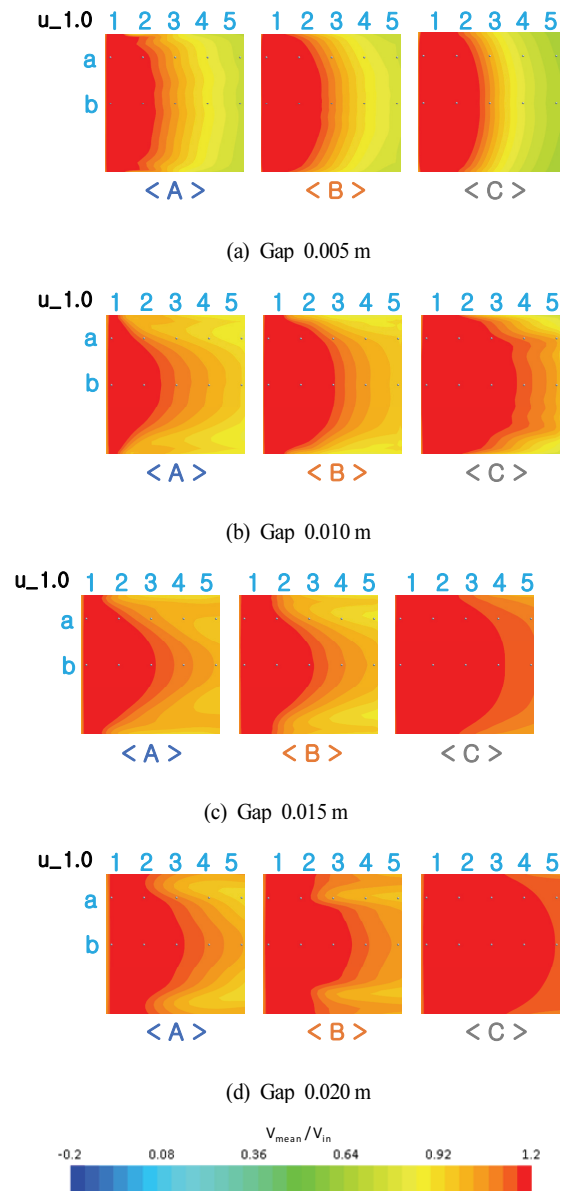


Fig. 11 U contour distribution at plane in $U=1.0 \text{ m/s}$

4.2 해수이차전지 주변의 평균 유동장 비교

본 연구에서는 해수이차전지 셀이 가로방향으로 10개가 배치되어 있는 형태로 간략화하였으나, 실제 다단의 해수이차전지가 설치될 수 있다. 이때, 후단에 위치하는 해수이차전지의 경우 전단에 위치하는 해수이차전지 후류의 영향을 직접적으로 받으므로 설치위치에 따라 유입속도의 차이가 있을 수 있다. 이를 확인하고자 Fig. 12에는 해수이차전지 주변의 X 방향 평균 유동장(U component)을 나타내었고 각 유입류의 유속으로 무차원화하여 도시하였다. 전체적으로 해수이차전지 후류는 유입속도에 비해서 감소되는 경향을 보이고 있으나 유속의 변화보다는 셀 간격의 영향이 큰 것으로 관찰되었다. 특히, 해수이차전지 셀 간의 간격이 가장 작

있던 0.005 m인 경우, 나머지 세 간격에서 관찰된 결과에 비해 해수이차전지 후방의 유속이 상대적으로 많이 감소되어 있음을 알 수 있고 그 느린 유속의 영역도 후류 방향으로 크게 분포하고 있다. 셀 간격이 넓어짐에 따라, 셀 후방의 유속과 셀과 셀 사이의 열린 공간 후방의 유속 간 차이가 점차 증가한다. 즉, 셀 간격이 넓은 경우에는 해수이차전지 후방에 빠른 유속과 느린 유속이 반복적으로 존재하고 있음을 알 수 있는 반면 셀 간격이 가장 좁은 0.005 m 조건의 경우에는 셀과 셀 사이의 공간후방에서도 가속되는 영역이 관찰되지 않았다. 즉, 간격이 0.005 m인 경우는 해수이차전지 셀과 셀 사이의 충분하지 못한 간격으로 인해 셀 표면에서의 마찰에 의해 감소된 유속이 회복되지 못하고 후방으로 배출된다. 이에 따라 후방의 유속 회복성이 다른 간격들에 비해 낮다. 이러한 현상은 해수이차전지의 셀과 셀 사이의 간격이 넓어질

수록 완화됨을 보인다. 그리고 셀 간격과 상관없이 해수이차전지의 양끝단에서는 유동의 박리로 인한 재순환영역이 관찰되었으나, 그 크기 역시 셀 간격에 따라 차이를 보이고 있다. 즉, 셀 간격이 가장 작았던 경우에는 측면의 재순환영역의 크기가 상대적으로 크고 두꺼운 반면, 셀 간격이 넓어질수록 재순환영역의 크기는 작고 얇아지는 경향을 보였다.

4.3 해수이차전지 후방의 유속 비교

앞서 언급한 바와 같이 해수이차전지 후방의 유속을 확인하고자 총 30개의 포인트를 정의하였다. 특히, Fig. 9에 나타난 것처럼 홀수로 정의된 점은 해수이차전지 셀 후방에 있음을 의미하고, 짝수로 정의된 점은 해수이차전지 셀과 셀 사이, 즉 열린 공간의 후방에 위치하고 있음을 의미한다.

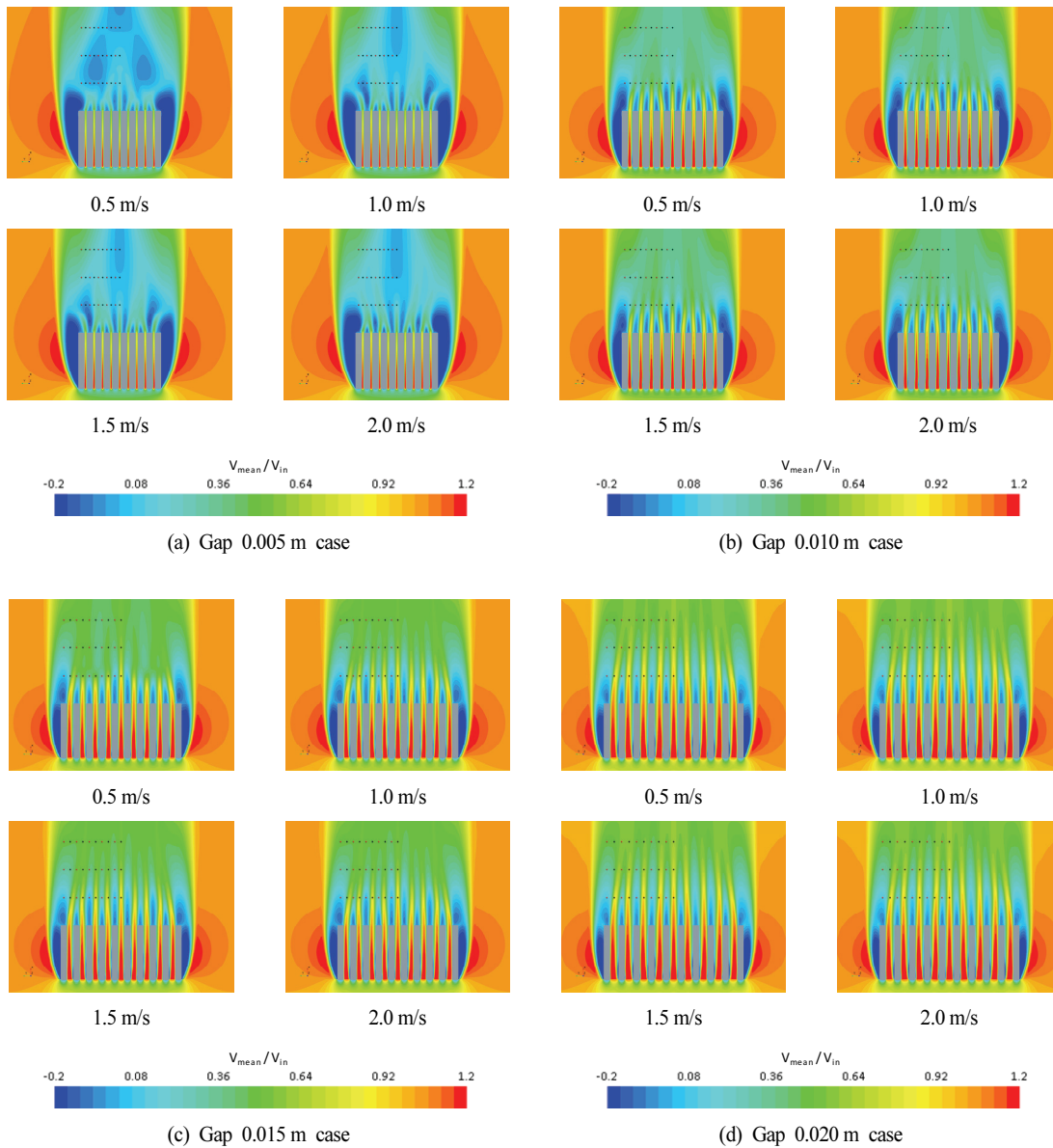
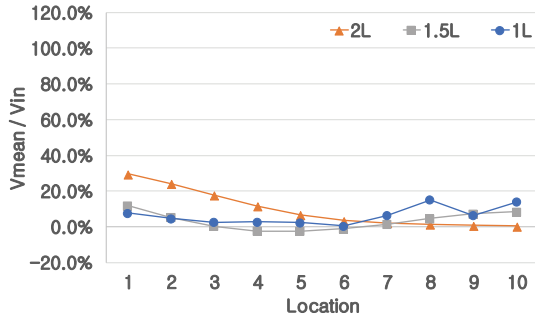


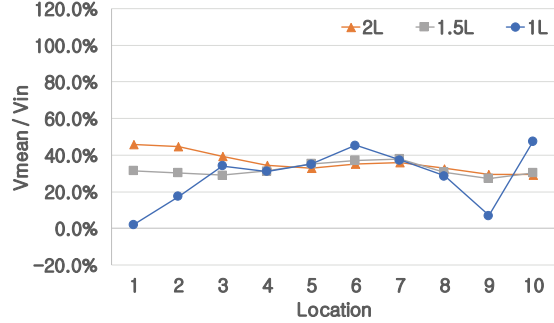
Fig 12. Time averaged flow field

Fig. 13에는 각 30개의 지점에서 산출한 유속을 간격별로 구분하여 나타내었고, 각 유입 유속으로 무차원화하여 정의

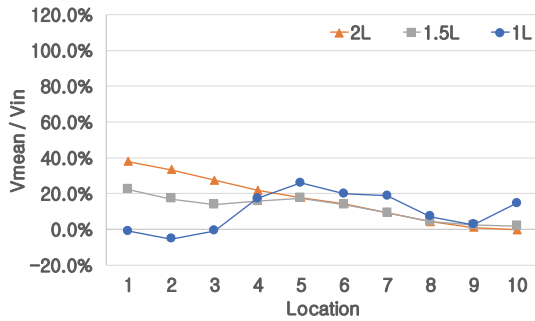
하였다. 셀 간 간격이 0.005 m인 경우, 후류의 유속은 유입류의 유속에 상관없이 유입류 유속의 약 40% 이하로 나타났



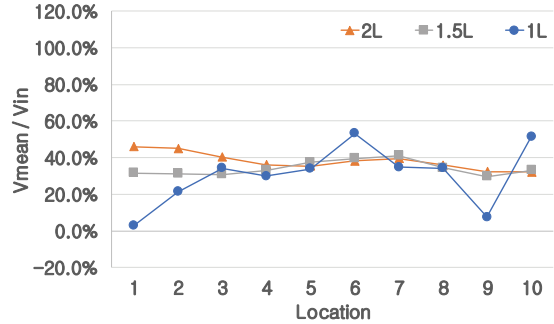
유입류 속도(V_{in}): 0.5 m/s



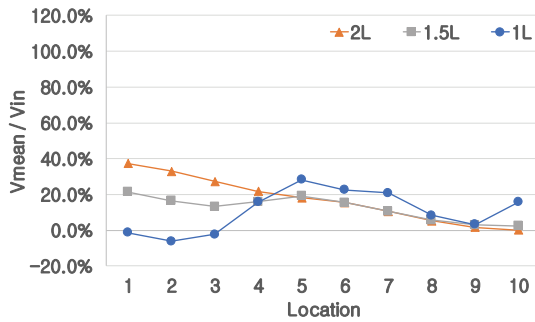
유입류 속도(V_{in}): 0.5 m/s



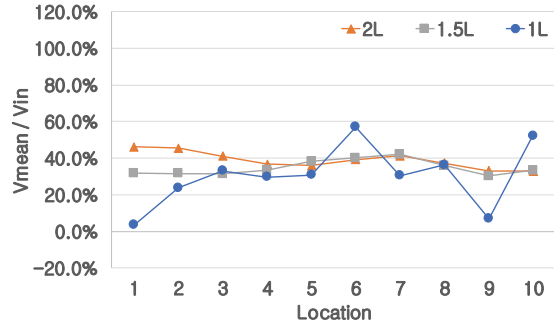
유입류 속도(V_{in}): 1.0 m/s



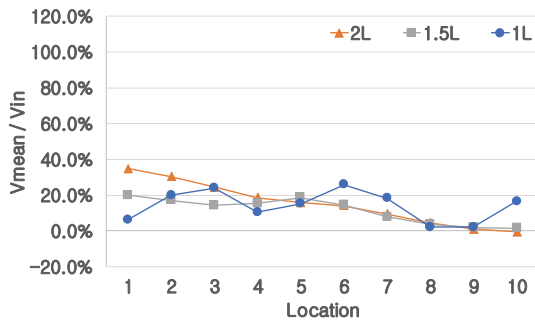
유입류 속도(V_{in}): 1.0 m/s



유입류 속도(V_{in}): 1.5 m/s

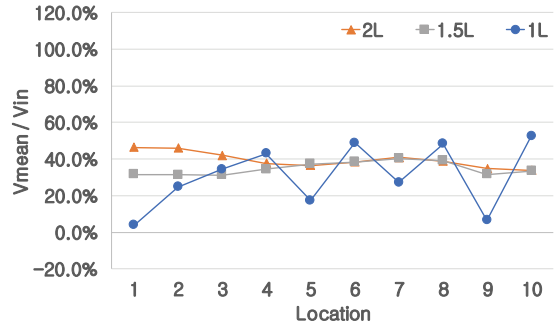


유입류 속도(V_{in}): 1.5 m/s



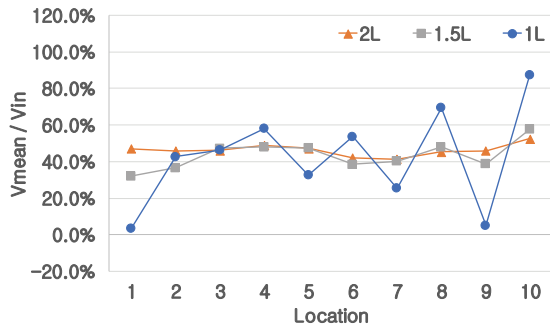
유입류 속도(V_{in}): 2.0 m/s

(a) Gap 0.005 m case

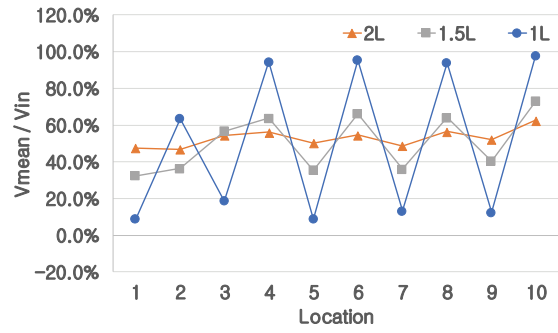


유입류 속도(V_{in}): 2.0 m/s

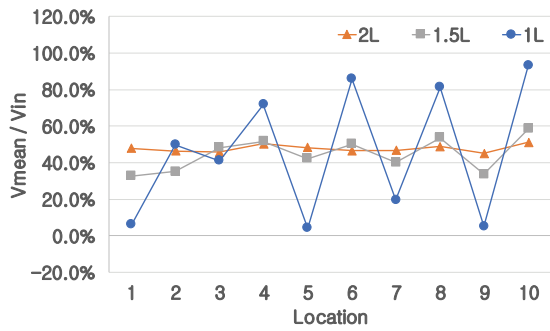
(b) Gap 0.010 m case



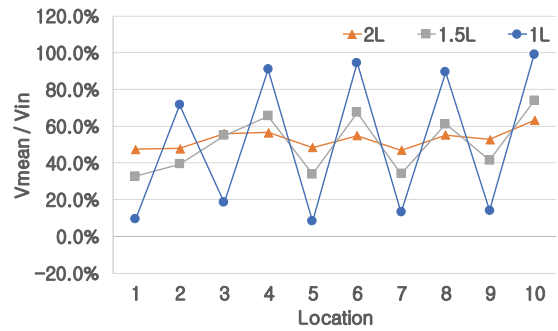
유입류 속도(V_{in}): 0.5 m/s



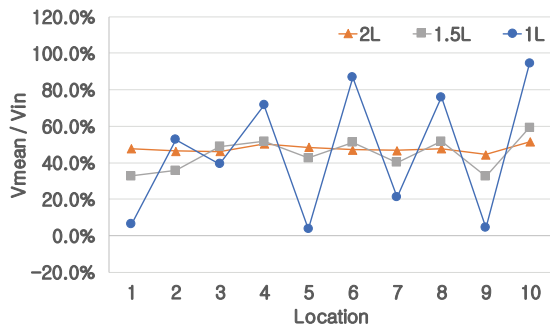
유입류 속도(V_{in}): 0.5 m/s



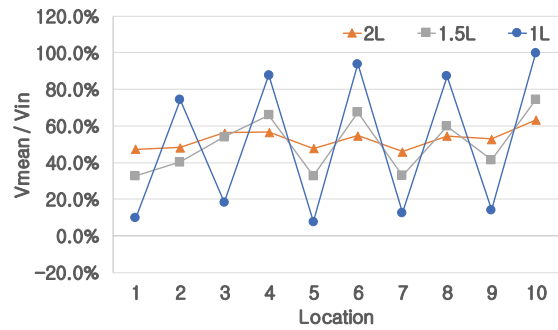
유입류 속도(V_{in}): 1.0 m/s



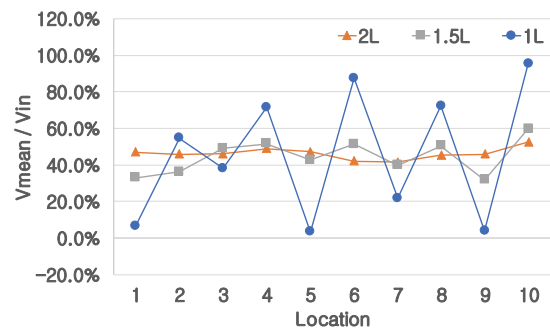
유입류 속도(V_{in}): 1.0 m/s



유입류 속도(V_{in}): 1.5 m/s

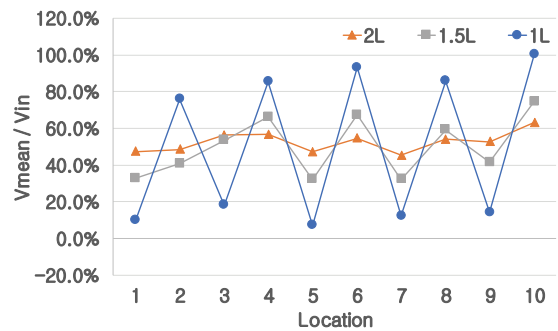


유입류 속도(V_{in}): 1.5 m/s



유입류 속도(V_{in}): 2.0 m/s

(c) Gap 0.015 m case



유입류 속도(V_{in}): 2.0 m/s

(d) Gap 0.020 m case

Fig. 13 Flow rate wake of seawater secondary battery

고, 일부 위치에 따라서는 유입류와 반대방향으로의 유동도 관찰되었다. 해수이차전지 중심으로부터 1L만큼 떨어진 지점에서 계측된 유속의 경우 셀 간의 간격이 점점 넓어짐에 따라 유속의 분포 특징이 점차 변화하고 있음을 알 수 있다. 즉, 빠른 유속과 느린 유속이 번갈아가며 엇갈리게 산출되는 경향이 강해진다. 또한 해수이차전지 셀 간의 간격이 가장 넓은 0.020 m인 경우, 후류의 최대 유속이 유입유속의 약 100%에 근접하게 예측되었다. 이러한 결과는 해수이차전지 후방의 흐름이 해수이차전지 내부 유속의 영향을 받기 때문이다. 해수이차전지 내부 유속이 빠를수록 해수이차전지 중심으로부터 1L만큼 떨어진 해수이차전지 후방 위치에서 셀과 셀 사이 후방의 유속은 빠르게 된다. 해수이차전지로부터 2L만큼 떨어진 지점에서 유속의 분포는 해수이차전지 셀 간의 간격이 0.010 m 이상에서는 유입류의 약 40~50% 정도 수준으로 예측된다. 반면, 해수이차전지 셀 간의 간격이 0.005 m인 경우에는 위치에 따른 차이는 있으나 유입유속에 상관없이 유입유속의 0~30% 수준으로 예측되었다. 해수이차전지 중심으로부터 2L만큼 떨어진 지점에서는 1L만큼 떨어진 지점에서보다 빠른 유속과 느린 유속의 엇갈림 현상이 줄어들음을 알 수 있다.

4.4 해수이차전지의 항력 비교

해수이차전지를 실제 제품화 하기 위해서는 해수이차전지의 항력을 아는 것이 필요하다. 실제로 해수이차전지는 선박형 부이나 비상용 부이 등에 부착되어진다. 이 때 부이의 계류계 설계 시 해수이차전지의 항력 정보가 필요하게 된다. 따라서 본 연구에서는 해수이차전지 셀 간격별, 유속별 항력을 산출하였고 이를 Table 5와 Fig. 14에 나타내었다. 이 결

Table 5 Drag and difference of various conditions

Inflow velocity [m/s]	Gap [m]	Drag [N]	Diff. [%]
0.5	0.005	2.88	100.0
	0.010	2.84	98.6
	0.015	2.78	96.5
	0.020	2.74	95.1
1.0	0.005	11.06	100.0
	0.010	11.00	99.5
	0.015	10.78	97.5
	0.020	10.66	96.4
1.5	0.005	24.60	100.0
	0.010	24.40	99.2
	0.015	23.96	97.4
	0.020	23.72	96.4
2.0	0.005	43.88	100.0
	0.010	42.90	97.8
	0.015	42.30	96.4
	0.020	41.88	95.4

과로부터 알 수 있는 것은 같은 유속에서는 간격이 커질수록 전체 저항이 점점 감소하는 경향으로 이는 모든 유속조건에서 일관되게 나타났다. 또한 유속에 따라서 차이는 있지만, 해수이차전지 셀 간의 간격이 가장 작은 경우와 가장 넓은 경우의 항력 차이는 대략 4~5% 정도로 유사하였다. 이를 통해 셀과 셀 사이의 간격이 해수이차전지의 전체 항력에 영향을 미치는 걸 확인할 수 있었다.

추가적으로 해수이차전지의 간격효과를 고찰해 보고자 셀 사이의 간격이 없는 육면체 형태의 물체에 대해서도 유동장을 해석하였다. 즉, 해수이차전지 셀의 간격이 0.005 m인 경우를 대상으로 정하고 셀 간격을 메워서 구성하였다. Fig. 15에는 유속이 1.0 m/s인 경우의 유동장을 함께 나타내었고, Table 6에는 항력을 비교하였다. Table 6과 같이 간격이 없는 경우의 항력은 간격이 존재하는 경우 대비 약 40% 정도 증가됨을 알 수 있었다.

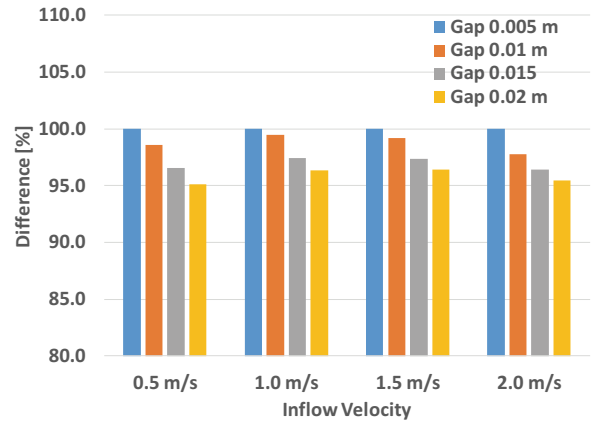


Fig. 14 Drag difference of seawater secondary battery

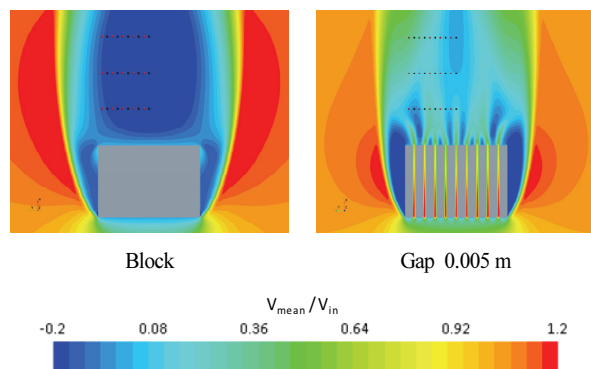


Fig. 15 Time averaged flow field at block and gap 0.005 m

Table 6 Drag and difference between gap 0.005 m case and block

Inflow velocity [m/s]	Gap [m]	Drag [N]	Diff. [%]
1.0	0.005	11.06	100.0
	Block	15.48	139.9

5. 결 론

본 연구에서는 해수이차전지 주변의 유동장을 분석하기 위해 해수이차전지의 셀과 셀 사이의 간격 및 유입류의 유속을 변수로 정의하였다. 4가지 간격과 4가지 유속조건 즉, 총 16가지 경우에 대해 수치해석을 수행하고 평균 유동장을 비교하였다. 이로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 해수이차전지 내부의 유속 분포는 간격의 영향이 크다. 즉, 동일한 간격 조건에서는 유입류의 유속에 상관없이 일정한 패턴으로 유속이 감소하였다. 간격이 변하는 경우에는 유속감속의 패턴이 변화하였다.
- 2) 해수이차전지 후방 유동장의 형태 및 유속의 분포도 유속보다는 간격의 영향이 큼을 알 수 있다. 특히, 셀 간격이 가장 좁은 0.005 m인 경우 후류의 재순환영역의 크기와 형태가 다른 셀 간격을 가지는 경우와 차이를 보인다.
- 3) 해수이차전지의 중심에서 후방으로 1 L만큼 떨어진 지점에서 비교한 후류의 유속은 셀 간격에 따라서 차이를 보였다. 셀 간격이 작은 경우에는 상대적으로 최대유속과 최소유속 간의 차이가 적었던 반면 셀 간격이 큰 경우는 그 차이가 큼을 알 수 있다. 이로부터 여러 단의 해수이차전지가 설치되는 경우 적절한 배치 위치를 결정하는데 본 결과가 활용될 수 있다.
- 4) 일정한 유속에서 해수이차전지의 항력은 셀과 셀 사이의 간격이 증가할수록 감소한다. 또한 간격이 없는 육면체 블록의 항력은 같은 길이를 가지고 간격이 존재하는 해수이차전지의 항력보다 약 40% 큼을 알 수 있었다. 이로부터 해수이차전지를 고려한 설계 진행 시 셀 간의 간격도 고려할 필요가 있음을 알 수 있다.

본 연구를 통해 해수이차전지의 주변 유동장에 대한 이해를 높일 수 있었고, 또한 향후에는 자유수면이 해수이차전지 주변 유동장에 미치는 영향 등에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임.(20215610100030, 1kWh급 이상 해수이차전지 단위모듈 적용 해양기기 제품개발)

References

- (1) Kim, D. Y., Park, J. S., Lee, W. G., Choi, Y. S., and Kim, Y. S., 2022, "Development of Rechargeable Seawater Battery Module," *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 169, No. 040508.
- (2) Kim, Y. G., Kim, G. T., Jeong, S. S., Dou, X., Geng, C., Kim, Y. S., and Passerini, S., 2019, "Large-scale stationary energy storage: Seawater batteries with high rate and reversible performance," *Energy Storage Materials*, Vol. 16, pp. 56-64.
- (3) Arnold, S., Wang, L., and Presser, V., 2022, "Dual-Use of Seawater Batteries for Energy Storage and Water Desalination," *Small*, Vol. 18, No. 2107913
- (4) Kim, Y. G., Hwang, S. M., Yu, H. I., and Kim, Y. S., 2018, "High energy density rechargeable metal-free seawater batteries: a phosphorus/carbon composite as a promising anode material," *Journal of Materials Chemistry A*, Vol. 6, pp. 3046-3054.
- (5) Jang, H. J., Kim, H. J., Kim, H. H., Park, C. S., and Lee, K. C., 2021, "A study of BMS Algorithm for Operation of a Seawater Secondary Battery," *Proceedings of the KSMPE Spring Conference*.
- (6) Yu, D., and Kareem, A., 1998, "Parametric study of flow around rectangular prisms using LES," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 77&78, pp. 653-662.
- (7) Yu, D., and Kareem, A., 1996, "Two-dimensional simulation of flow around rectangular prisms," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 62, pp. 131-161.