◎ 논 문

조력발전소와 연계한 해류발전단지의 활용에 대한 유동해석 연구

이승호* · 이상혁* · 장경수** · 이정은*** · 허남건****†

A Numerical Study on the Application of the Ocean Current Power Parks with a Tidal Power Plant

Seung-Ho Lee*, Sang-Hyuk Lee*, Kyung-Soo Jang**,
Jung-Eun Lee***, Nahm-Keon Hur****†

Key Words : Ocean current power generation(해류발전), Ocean current power park(해류발전단지), Ocean current power generator(해류발전기), Tidal power plant(조력발전소), CFD(전산유체역학)

ABSTRACT

The Shiwhaho is an artificial lake located in Yellow sea of Korea where the ocean tidal current is significantly strong, and the tidal power plant is currently being under construction to generate electric power from the ocean tidal current. In addition to the tidal power plant under construction, an ocean current power park was proposed to maximize the power generation by utilizing the ocean current generated by the tidal power plant. To evaluate the feasibility of such combined power plant, the flow characteristics in the ocean current power parks connected with the tidal power plants were investigated numerically in the present study. When two different type of generations are operating together as a system, their interference may occur, which affects their efficiency. Therefore, the minimum distances between the tidal power plants and the ocean current power generators are studied in the present study to minimize such interference. The feasible region to generate power around the Shiwha tide embankment is also predicted by considering predicted ocean current speed distribution. Various arrangements of the ocean current generators are examined and an optimal arrangement is also discussed.

1. 서 론

최근 에너지 문제의 심각성을 인식한 선진 국가들을 중심으로 에너지 문제를 극복하기 위한 노력이 계속되고 있다. 이에 따라 대체에너지 개발에 관한 연구가 증가하고 있다. 다양한 대체 에너지 중 기존의 태양력 및 풍력 발전은 기상 상태에 많은 영향을 받고 파력이나 해양 온도차 발전은 환경에 영향을 많이 받는 단점이 있다. 반면에 해류발전은 기본적인 발전 방식이 풍력 발전과 유사하고 오염이 없는 청정 에너지원이지만 기타의 다른 대체에너지와는 달리 날씨의 변화나 환경에 상관없이 지속적인 발전이 가능하다. 이러한 해류 발전에 대하여 여러 연구자들의 연구가 선행되었다. Kiho 등[1]은 새로 제안된 Darrieus 터빈에 대한 실험을 통하여 해류 발전에서의 전력 생산량을 증진시켰고, 조철희 등[2]은 실험을 통하여 멀티 유속과, 블레이드의 위치에 따른 상호간의 간섭효과에 대해 설명하였다. 이러한 기존의 연구들은 풍동 실험이나 실제로 설치되어 있는 발전기에 대해 이루어졌다. 최근 들어 컴퓨터의 급속한 발달에 따른 전산유체역학(CFD)의 발전으로 수치시뮬레이션의 이용이 늘어남으로서 복잡한 유동현상을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 해석하고 설계를 개선하는 사례들이 많이 보고되고 있다. Batten 등[3]은 수평축 해류 터빈에 대한 실험과 수치

* 서강대학교 대학원
** (주)삼안
*** 블루 오션 파워
**** 서강대학교 기계공학과
† 교신저자, E-mail : nhur@sogang.ac.kr

해석을 통하여, 수치해석의 타당성을 검증하였으며 날개의 형상을 최적화 하였고, Huang 등[4]은 좁은 운하에서 해류의 움직임과 그 불규칙성에 대하여 수치해석을 이용하여 예측하였다. 최근 들어 장경수와 이정은[5,6]은 일련의 연구를 통하여 인공구조물인 조력발전소의 해수 순환과정에서 발생되는 빠른 속도의 해류를 이용한 해류발전의 가능성을 보고하였으며, 조력발전과 해류발전을 겸하는 통합발전시스템을 제안하였다. 또한 Lee 등[7]은 수치해석을 통해 해류발전단지의 배열에 따른 간섭현상을 예측하였고 최적화된 배치를 제안하였다.

대한민국의 서해안 지역은 조석 간만의 차가 큰 지역으로 해류발전이 효과적으로 이루어 질 수 있다. 서해안에 위치한 시화호는 1994년 시화 방조제를 건설하면서 생긴 인공호수로서 56.5 km^2의 넓은 면적을 차지하고 있다. 시화호 주변의 해안지역은 최고 9m, 평균 5.64 m의 큰 조석간만의 차를 가지고 있으며 이는 해류발전에 있어서 최적지이다. 따라서 본 연구에서는 시화호에 위치한 조력발전소에 해류발전단지를 연계했을 경우에 해류발전의 효율을 극대화하기 위해서 실제 조력발전소와 주변지형을 고려하여 수치해석 하였다.

본 연구에서는 바다 측, 호수 측 해류발전기의 배치에 따른 해류발전기간의 간섭효과에 대해 수치해석 하였고, 각 경우에 따른 효율을 산출하여 최적화된 배치에 대해 검토하였다. 또한 바다 측 해류발전 단지 주변 지형에 따른 해류의 속도를 고려하여 발전이 가능한 범위에 대하여 예측하였고, 호수 측 해류발전단지에 이미 설치되어있는 수차발전기를 고려하여, 해류발전기가 수차발전기의 발전에 영향을 미치지 않는 설치거리에 대해 연구하였다.

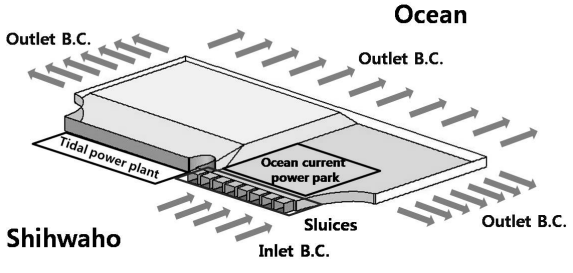


Fig. 1 Geometry for the analysis of current flow around the ocean current power park

2. 수치해석 방법

2.1 지배방정식

본 연구에서는 수치해석을 수행함에 있어서 상용 프로그램인 STAR-CD V3.24를 사용하였으며 다음과 같이 정상상태에서의 연속방정식과 운동량방정식이 적용되었다.

$$\nabla \cdot \bar{u} = 0 \tag{1}$$

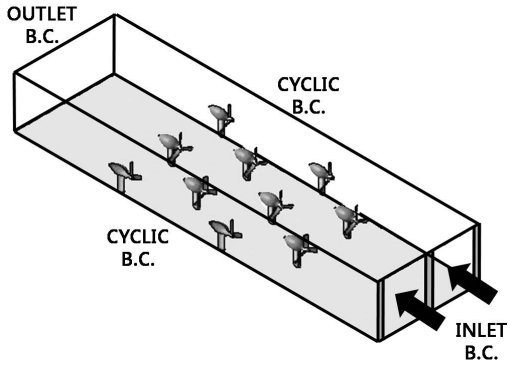
$$\rho \bar{u} \cdot \nabla \bar{u} = -\nabla p + \nabla \cdot \mu[(\nabla \bar{u}) + (\nabla \bar{u})^T] + \rho \bar{g} \tag{2}$$

여기서 $\bar{u}$는 속도벡터, p는 압력, ρ는 밀도, μ는 점성계수, $\bar{g}$는 중력가속도를 나타낸다. 수치해석의 계산시간은 본 연구실에서 보유하고 있는 옵테론 2.4 GHz 2 CPU 리눅스 클러스터를 사용하여 바다 측 해류발전단지는 약 15시간, 호수 측 해류발전단지는 약 24시간이 소요되었다.

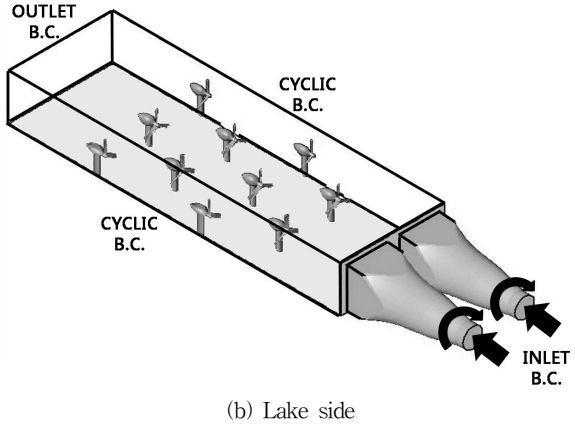
2.2 해석 격자 및 해석 영역

바다 측 해류발전단지에 대해 해류발전단지 주변 지형을 나타내기 위하여 Fig. 1과 같은 해석 영역을 나타내었다. 이때 사용된 격자의 수는 약 440만개이며, 해류발전단지가 위치한 쪽의 수심은 11.5 m이고, 해류발전단지가 위치해 있지 않은 쪽은 5.5 m에서 16.5 m의 수심을 갖는다.

Fig. 2(a)에서 보는 바와 같이 바다 측 해류발전단지의 배치에 따른 간섭 효과를 알아보기 위해 사용된 해석영역은 일정한 배치가 반복되기 때문에 일부분만 표현되었다. 사용된 격자는 약 250만개이며 바닥부터 해수면까지의 거리는 11.5 m이고 해류발전기 날개 중심까지의 거리는 6 m이다. 날개 하나의 길이는 4 m로 3개의 날개가 120도의 각도를 이루고 있다. 해류 발전기간의 좌우 거리는 16 m(2DS)이고, 해석 영역의 폭은 32 m(4DS)이다. 여기서 DS는 바다 측 해류발전기 날개의 지름인 8 m를 나타낸다. 수문으로부터 30 m 떨어진 곳에 첫 번째 해류 발전기가 위치해 있으며, 후류의 영향을 고려하여 마지막 해류발전기의 뒤쪽 30 m까지 해석하였다. 해류발전단지 주변 지형을 고려하면 해류가 넓은 지역으로 퍼져나가기 때문에 해석 영역의 넓이도 차이가 있어야 하지만, 본 수치해석은 해류발전기 간의 간섭을 알아보기 위하여 일정 넓이의 해석 영역을 설정하였고, 지형에 의해 감소하는 해류 속도에 대한 해석은 별도로 수행하였다.



(a) Sea side



(b) Lake side

Fig. 2 Geometry and boundary condition for the analysis of interference effect

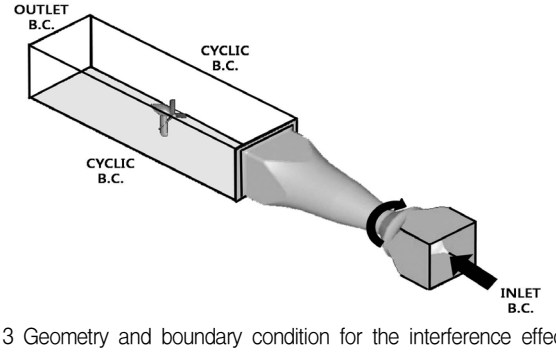


Fig. 3 Geometry and boundary condition for the interference effect of the ocean current power generator on the turbine generator

호수 측 해류발전단지가 이미 설치되어 있는 수차발전기의 발전에 미치는 영향을 알아보기 위해서 Fig. 3과 같은 해석모델을 사용하였다. 해석에 사용된 격자의 수는 약 300만개이며, 해류발전기와 수차발전기의 영향만을 고려하기 위하여, 수차발전기와 가장 인접한 해류발전기를 표현하였다.

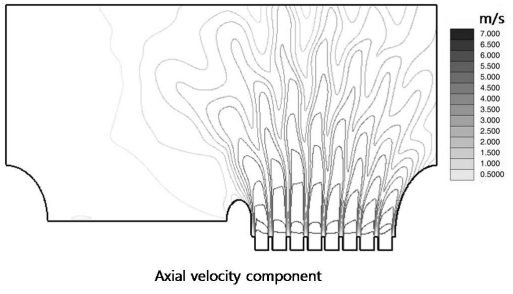


Fig. 4 Velocity distribution around the ocean current power park

Fig. 2(b)에서 나타난 바와 같이 호수 측 해류발전단지의 배열에 따른 간섭 효과를 알아보기 위해 사용된 격자는 약 350만개 이며 바닥부터 해수면까지의 거리는 17.5 m이고 해류발전기 날개 중심까지의 거리는 8 m이다. 날개 하나의 길이는 5 m로 3개의 날개가 120도의 각을 이루고 있다. 해류 발전기간의 좌우 거리는 20 m(2 DL)이고, 해석 영역의 폭은 40 m(4 DL)이다. 여기서 DL은 호수 측 해류발전기 날개의 지름인 10 m를 나타낸다. 수문으로부터 30 m 떨어진 곳에 첫 번째 해류 발전기가 위치해 있으며, 후류의 영향을 고려하여 마지막 해류발전기 뒤쪽 30 m까지 해석하였다.

2.3 경계 조건

바다 측 해류발전 단지에서는 썰물 때의 수두 차 1.9 m에 의해 8개의 수문을 통해 수문과 수직한 방향으로 평균 6.0 m/s의 속도로 해류가 유입된다. 해류발전단지 주변 지형을 고려한 해석 영역에서는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 해류가 유입되는 수문에는 입구 경계조건을 설정하였고, 바다로 퍼져나가는 세 면에는 출구 경계조건을 적용하였다. 해수면은 대칭 경계조건을 적용하였으며, 바닥 면은 벽 경계조건을 적용하였다.

해류발전기간의 간섭을 해석하기 위한 해석 영역에서는 Fig. 2(a)와 같이 반복되는 형상을 표현하기 위하여, 양쪽 옆면에는 순환 경계조건이 적용 되었다. 그리고 수면 부분은 대칭 경계조건을 적용하였으며 출구부분은 출구 경계조건을 적용하였다. 해류발전기의 회전을 모사하기 위하여 회전 영역에 MRF(Multi Reference Frame)를 적용하였고, 6.0 m/s의 해류속도로부터 8 rpm의 발전기 회전을 얻을 수 있다고 가정하여 해석하였다[6].

호수 측 해류발전 단지에서는 밀물 때의 수두차가 6.0 m이고, 수두차에 의하여 지름 7.5 m의 원형 수차발전기 출구로 부터 해류발전기 에서의 평균속도가 3.0 m/s가 되도록 해류가 유입된다. 호수 측 해류발전단지로의 해류 유입속도가 바다 측 해류발전단지로 유입되는 해류의 속도보다 작은 이유는 해류가 수차발전기를 통과하면서 해류의 운동에너지가 수차발전기

에 의해서 소진되기 때문이다.

Fig. 3에서 나타나는 바와 같이 호수 측 해류발전기의 수차발전기에 대한 영향을 나타내기 위한 해석 영역에서의 수차발전기와 해류발전기에 MRF(Multi Reference Frame)를 적용하였다. 6.0 m의 수두 차에 의한 수차발전기의 날개 회전 속도는 64.28 rpm으로 가정하였고, 3.0 m/s의 해류 속도에 의한 해류발전기 날개의 회전속도는 8rpm으로 가정하여 해석하였다[6]. 그 외의 경계조건은 바다 측 해류발전단지와 동일하게 적용되었다.

해류발전기 간의 간섭을 나타내기 위한 해석 영역에서는 Fig. 2(b)와 같이 수차발전기를 직접 나타내지 않고, 입구부분에 64.28 rpm의 회전을 설정함으로서 수차발전기의 영향을 나타내었다. 날개 회전속도를 제외한 다른 경계조건은 바다 측 해류발전단지와 동일하게 적용되었다.

3. 결과 및 토의

3.1 바다 측 해류발전단지

해류발전기를 이용한 발전을 위해서는 최소 2 m/s 이상의 해류의 속도가 필요하다[6]. 해류발전기 간의 앞뒤 간격이 클 경우에는 수문으로부터 먼 거리까지 발전이 가능할 만큼의 충분한 해류의 속도가 전해지지 못하기 때문에 적당한 간격의 배치가 필요하다. 본 연구에서는 시화호의 지형 및 시화 방조제를 고려하여 수문을 통과한 해류의 속도에 대해서 수치해석 하였다. 해류발전단지 주변의 속도 분포는 Fig. 4와 같이 나타났다. 해류가 수문을 통과한 후에 넓은 지역으로 확산되어 나감에 따라 해류의 속도가 점차 감소하는 것을 확인할 수 있다. 수문 중심에서 수문과 수직한 방향으로의 속도는 Fig. 5에 나타나 있고 그래프에서의 Gate1~Gate8은 수문 구조물의 순서를 나타내며, 수차발전기와 가까이 있는 쪽부터 Gate1로 나타내었다. 그래프에 나타나 있는 바와 같이 해류가 수문을 통과하여 해류발전단지 내로 유입된 후 약 140 m까지 2 m/s 이상의 속도를 유지한다. 따라서 수문으로부터 약 140 m 이내의 범위에 해류발전기를 설치하는 것이 발전량을 고려하였을 때 가장 적합하다.

해류발전기가 여러 열로 설치가 되고, 해류발전기 날개의 회전방향이 서로 엇갈리게 설치되기 때문에, 해류발전기 간의 앞뒤 간격이 작을 경우에는 앞쪽 해류 발전기의 후류의 영향으로 뒤쪽에 위치한 해류발전기의 발전에 영향을 줄 수 있다. 본 연구에서는 해류 발전기 간의 앞뒤 간격을 1.8 DS에서 6 DS까지 변화시켜서 수치해석 하였다.

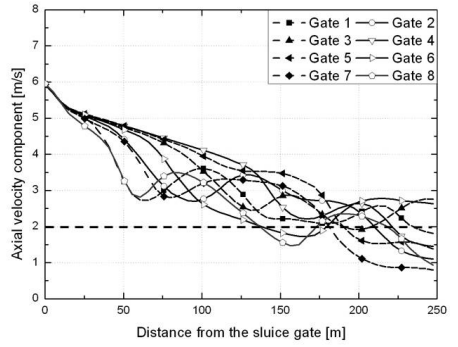


Fig. 5 Current velocity for the distance from sluices

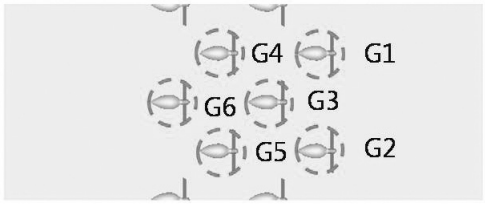


Fig. 6 Relative location of generators

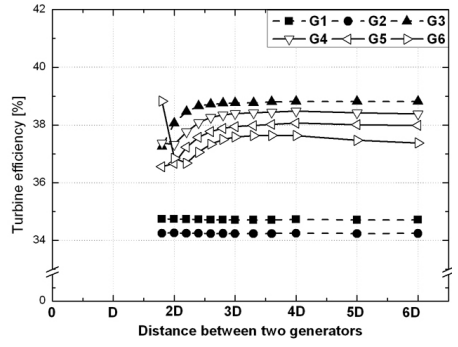


Fig. 7 Turbine efficiency for the arrangement change in sea side

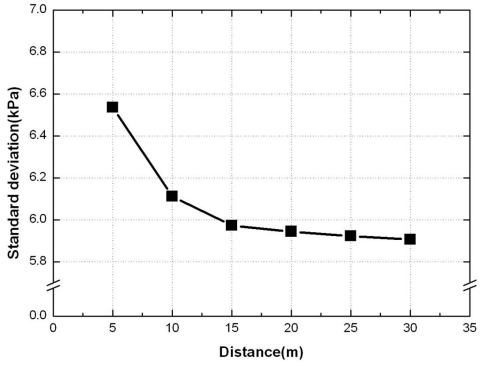


Fig. 8 Effect of the ocean current power generator on the turbine generator

해류발전기의 배치에 따라 주변의 해류발전기의 터빈 효율(η_t) 값이 변하게 된다. 터빈 효율은 유량이 가지고 있는 에너지에 대한 토크(T_{shaft})로 산출되는 에너지의 비로 나타낼 수 있고 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.

$$\eta_t = \frac{\omega T_{shaft}}{\rho \dot{q} g H} = \frac{\omega T_{shaft}}{\dot{q} \Delta p} \tag{3}$$

$$T_{shaft} = r \times (pA') \tag{4}$$

여기서 ω는 날개의 각속도, $\dot{q}$은 체적유량, H는 수두차, Δp는 발전기 앞뒤의 압력차를 나타낸다.

G1~G6는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 발전기의 상대적인 위치를 나내며 Fig. 7은 발전기간 거리에 따른 터빈효율을 나타낸 그래프이다. 이 그래프를 보면 발전기 간의 거리가 짧을수록 설치 가능한 발전기의 수가 많아지지만, 발전기 후류의 영향으로 인하여 터빈효율이 감소하는 현상이 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 유량이 발전기 주변에서 일정하지 않기 때문에 해류가 가진 에너지를 발전기 회전에 충분히 전달하지 못하고 따라서 효율적인 발전이 이루어지지 못함을 뜻한다. 발전기 간의 간격이 멀어질수록 후류의 영향이 줄어들고 터빈효율이 점차 증가하여, 해류발전기 간의 간격이 약 3.0 DS이상이 되는 경우부터는 터빈효율이 거의 변화가 없음을 확인 할 수 있다. 따라서 주변 발전기에 영향을 받지 않는 발전기간 거리는 약 3.0 DS이상으로 볼 수 있다.

3.2 호수 측 해류발전단지

호수 측 해류발전단지는 수문을 통과하여 흐르는 바다 측 해류발전단지와는 다르게 해류가 해류발전 단지에 이르기 전에 수차발전기를 통과하게 된다. 수차발전기는 해수면의 수두차에 의한 압력차로 작동을 하게 되며 이때 수차발전기 양단에 걸리는 압력차는 약 750 kPa이다. 수차발전기의 출구에서 해류발전기까지의 거리가 짧을 경우에 해류발전기가 수차발전기 출구 압력의 안정성에 영향을 미치게 되고 발전을 저해하는 요인이 될 수 있다. 수차발전기 출구 압력의 안정성은 압력분포의 표준편차(σ_P)로 나타낼 수 있으며 압력분포의 표준편차는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\sigma_P = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{n} (P - \overline{P})^2}{n}} \tag{5}$$

여기서 $\overline{P}$는 수차발전기 출구의 평균 압력을 나타내며, P는 수차발전기 출구 n개의 지점에서의 압력을 나타낸다. 따라서 본 연구에서는 해류 발전기가 수차발전에 미치는 영향을 확인하기 위하여 수차발전기 출구와 첫 번째 해류발전기 사이의 거리를 5 m에서 30 m까지 설정하여 수치해석 하였다.

Fig. 8은 수차발전기 출구 압력분포의 표준편차를 나타낸 그래프이다. 두 구조물 간의 거리가 가까운 경우 해류발전기의 영향으로 수차발전기 출구에서의 압력분포가 불안정하게 나타난다. 반면 두 구조물 사이의 거리가 약 20 m이상이 되었을 때, 수차발전기 출구의 압력 분포가 안정적으로 나타났으며 이는 해류발전기가 수차발전기 출구로부터 20 m이상 떨어져있을 때 수차발전기의 발전에 영향을 미치지 않는 것을 뜻한다.

호수 측 해류 발전기도 바다 측 해류발전기와 같은 형태로 배치가 되어 있기 때문에 인접한 해류 발전기의 영향을 받게 된다. 호수 측 해류발전단지에 대해서 바다측과 동일하게 해류발전기 앞뒤 간격을 1.6 DL에서 6 DL까지 변화시켜 수치해석 하였다.

Fig. 9는 발전기간 거리에 따른 터빈효율을 나타낸 그래프이다. 이 그래프를 보면 바다 측 해류발전단지와 비교해볼 때, 터빈효율의 변화가 다소일정하지 못한 것을 확인할 수 있다. 이는 수차발전기 회전의 영향으로 해류의 유입이 안정하지 못하기 때문으로 사료된다. 호수 측 해류발전 단지에서도 바다 쪽 해류 발전 단지와 동일한 이유로 해류발전기 간의 간섭현상으로 인하여 해류발전기 간의 간격이 작은 경우에 터빈효율이 감소하게 된다. 반면에 해류발전기 간의 간격이 약 3.0 DL이상인 경우부터는 후류의 영향이 줄어들고 터빈효율이 거의 변화가 없음을 확인 할 수 있다. 따라서 주변 발전기에 영향을 받지 않는 발전기간 거리는 약 3.0 DL이상으로 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 현재 건설 중인 시화호에 위치한 조력발전소에 가상의 해류발전단지를 연계했을 경우를 가정하여 해류발전의 효율을 극대화하기 위한 방안을 모색하기 위해 수치해석 연구를 수행하였다. 시화호 주변 지형과 설치되어 있는 수차발전기의 영향을 고려하여 해류의 속도를 예측 하고 이에 의한 해류 발전효율을 연구였다. 또한 추가 설치되는 해류발전기의 간섭에 의해 수차발전기 출구의 압력분포의 변화를 예측하여 수차발전기와 해류발전기 사이의 최소 거리를 제안하였으며, 해류 발전기의 배치에 따른 상호간의 간섭효과에 대해서도 예측하였다. 그 결과 바다 측 해류발전기는 수문으로부터 약 140 m 이내에 해류 발전기간의 간격을 해류발전기 지름의 3배 이상으로 설치하는 것이 발전 효율에 있어서 적합하고 호수 측 해류

발전단지는 수차발전기 출구로부터 약 20 m이상의 거리에 해류 발전기 간의 간격을 해류발전기 지름의 3배 이상으로 설치하는 것이 수차발전기와 해류발전기 모두의 발전 효율을 높이는 데에 가장 적합함을 알았다. 본 연구의 결과는 서해안에 위치한 시화호에 조력발전소와 연계한 대규모 해류발전단지를 건설할 경우 발전기의 배치 설계에 활용될 수 있을 것이다.

참고문헌

(1) Kiho, S., Shiono, M. and Suzuki, K., 1996, "The Power Generation from Tadal Currents by Darrious Turbine," WRFC, pp. 1242~1245.

(2) 조철희, 박관규, 조원철, 2006, "멀티 해류발전 블레이드 간섭 연구," 한국태양에너지학회논문집, Vol. 26, No. 4, pp. 47~54.

(3) Batten, W. M. J., Bahaj, A. S., Molland, A. F. and Chaplin J. R., 2007, "Experimentally Validated Numerical Method for the Hydrodynamic Designed of Horizontal Axis Tidal Turbines," Ocean Engineering. Vol. 34, pp. 1013~1020.

(4) Huang, H., Chen, C., Blanton, J. O. and Andrade, F. A., 2008, "A Numerical Study of Tidal Asymmetry in Okatee Creek, South Carolina," Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol. 78, pp. 190~202.

(5) 장경수, 이정은, 2008, "조력발전소와 연계한 해류발전단지," 한국풍력에너지학회 춘계학술대회 논문집, pp. 19~22.

(6) 장경수, 이정은, 2008, "조력발전소 수차구조물 및 수문구조물의 방출수를 이용한 해류발전," 제5회 한국유체공학학술대회 논문집, pp. 180~183.

(7) Lee, S. H., Lee, S. H., Jang, K., Lee, J. and Hur, N., 2008, "A Numerical Study for the Optimal Arrangement of Ocean Current Turbine Generators in the Ocean Current Power Parks," Abstract book of Renewable Energy 2008, p. 149.