

조력발전과 해류발전을 겸하는 통합발전시스템

*장 경수¹⁾, **이 정은²⁾

Integrated Power System Combining Tidal Power and Ocean Current Power

*Kyungsoo Jang¹⁾, **Lee Jungeun²⁾

Key words : Integrated power system(통합발전시스템), Tidal power plant(조력발전소), Ocean current power(해류발전), Tidal current power(조류발전), Ocean current turbine generator(해류 수차발전기)

Abstract : The integrated power system combining a tidal power plant and two ocean current power parks is suggested. It is characterized by the set up of an ocean current power park in the lake side by installing a number of ocean current turbines generating electricity by using sea water flow discharged into the lake side from the turbine generator of a tidal power plant and an ocean current power park in the sea side by installing a number of ocean current turbines generating electricity by using sea water flow exiting into the sea side through the sluice gate from the lake side.

The vision of the integrated power system is demonstrated by the simple theory and simulation results of the SIWHA Tidal Power Plant. And it is shown that the newly proposed integrated power system combining tidal power and ocean current power can produce very high economical benefits.

Nomenclature

η : efficiency of turbine
 ρ : density of sea water(kg/m³)
 g : gravity acceleration(m/s²)
 C_d : discharging coefficient
 A : flow passage area(m²)
 V : velocity of tidal current(m/s)
 $Z_1 - Z_2$: difference of water levels between sea side and lake side(m)

1. 서론

인류의 과학문명이 급속도로 발전하고 있지만 거대한 해양이 가지고 있는 무한정인 에너지에서 인간에게 유용한 에너지의 추출, 특히 전기에너지를 추출하기 시작한 것은 거의 최근의 일이다. 현재의 기술로는 해양에서 아무리 많은 에너지를 추출한다고 하더라도 해양에너지 총량에 미치는 영향은 거의 없을 것이다.

해양에너지 자원 중에서도 조력발전과 조류발전은 조석간만의 차를 이용하여 전기를 생산하는 방식인데, 조석의 주기성과 규모 때문에 대규모 개발의 가능성이 높은 편이다. 특히 우리나라 서·남해 연안은 조석간만의 차가 크고 리아스식 해안으로 구성되어 있어 조력발전과 조류발전 등을

위한 상당한 해양에너지가 부존하는 세계적인 해양에너지 개발 유망지역으로 알려져 있다⁽¹⁾.

본 논문의 동기는 조력발전을 통하여 전기에너지로 추출할 때 본래 해수가 가지고 있는 잠재 에너지 중에서 단지 일부만 추출하므로 조력발전 후에 발생하는 해수의 흐름 속에는 여전히 해류 수차발전기를 가동시키기에 충분한 에너지가 있을 것이라는 데 있다^(2,3).

따라서 본 논문에서는 이러한 가능성을 현재 우리나라 서해안에서 건설되고 있는 시화호 조력발전소에 대한 기존 연구결과를 바탕으로 한 조력발전소와 해류발전단지를 연계한 통합발전시스템을 통해 소개하고 경제적 가능성이 높음을 보였다.

2. 조력발전과 조류발전

2.1 조력발전 이론

조력발전^(1,4)은 조석간만에 의해 발생하는 해수의 위치에너지 차를 이용하여 발전하는 방식으로, 현재 우리나라에서 건설중인 시화호 조력발전소는 방조제를 중심으로 외해 수위는 관리수위

1) (주)삼안 E-mail : ksjang@samaneng.com
Tel : (02)509-4774, (016)627-1311
2) 블루오션파워 대표 Tel : (010)3036-3976
E-mail : blueoceanpower@hanmail.net

를 기준으로 시간에 따라 상하로 수 m씩 변화하고, 반면에 호수(조지) 내에서는 관리수위 이하로 유지되도록 하여야 하기 때문에 발전시 외해 수위가 높고 호수의 수위가 낮게 유지되는 단류식 창조식 발전방식을 택하고 있다.

조력발전에 의한 발전출력은 다음 식과 같다.

$$P = \eta \rho g C_d A \sqrt{2g(Z_1 - Z_2)^3} \quad (1)$$

따라서 조력발전의 발전출력은 수차터빈의 효율과 블레이드의 회전단면적에 비례하고 조석간만의 차에 의한 해수와 호수의 수위 차의 3/2제곱에 비례한다. 조석간만의 차가 클수록 경제성이 높게 되며 일반적으로 5m 이상인 곳을 유망한 개발후보지로 선정한다.

2.2 조류발전 이론

해양에너지 자원 중에서 실용화가 진행되고 있는 또 하나의 발전방식인 조류발전^(1,5)은 조류의 운동에너지로부터 전기에너지를 추출하는 발전방식이다.

조력발전은 인공적으로 방조제를 만들고 방조제 전후의 해수의 낙차를 이용해 발전하지만 조류발전은 대개 자연적으로 흐르는 조류의 길목에 수차발전기를 설치해 발전한다. 조류는 조석간만에 의한 자연적인 해수의 흐름으로, 넓은 의미에서 해류에 포함된다.

조류발전은 풍력발전과 비슷한 원리로, 바람 대신 지속적으로 흐르는 조류를 이용해 터빈을 돌린다는 점이 다르며, 다만 해수의 밀도가 공기의 밀도에 비해 약 840배 크기 때문으로 같은 시설용량일 경우 풍력발전기에 비하여 조류발전기의 크기가 훨씬 작아지며, 해저설치에 따른 발전 시설 구조물의 안정성 및 유지보수문제가 중요하게 다루어진다.

조류발전에 의한 발전출력은 다음과 같다.

$$P_w = 0.5\eta\rho AV^3 \quad (2)$$

조류발전에서 얻을 수 있는 발전출력은 수차발전기의 효율과 해수통과 단면적에 비례하고 조류속도의 3제곱에 비례하므로 높은 유속은 조류발전에 절대적으로 유리하다. 일반적으로 조류발전은 유속이 1m/s 내외인 곳에서도 가능하나 경제성 있는 발전을 위해서는 평균유속이 2m/s 이상인 곳을 바람직한 후보지로 선정한다⁽¹⁾.

2.3 조력발전과 조류발전의 장단점

조력 및 조류에너지는 태양과 달과 지구 사이의 만류인력에 기인하는 에너지로 태양계가 준속하는 한 지속되는 무한청정에너지이고, 조석의 주기성으로 인하여 기상과 계절의 영향을 받지 않고, 발전출력의 장기적인 예측이 가능하며, 일정한 시간 동안 지속적인 전력공급이 가능하고 전력망내 연결이 용이하며, 원자력발전 다음으로 기저발전을 담

당할 수 있는 장점이 있다. 반면 발전이 단속적이고 발전부지가 육지에서 멀리 떨어질 경우는 송전선로 구축 등으로 인한 초기 투자비가 큰 것이 단점이다.

외국의 경우 조력발전은 댐의 담수 지역 내로 실트(침적토)가 쌓임에 따라 대단히 높은 처리비용문제와 환경문제 때문에 방조제 형태의 조력발전에 대한 계획은 최근에는 드문 실정이다⁽⁶⁾. 하지만 국내의 경우 ‘시화호 조력발전소’가 2009년 10월말을 준공목표로 건설 중이며, ‘가로림 조력발전소’는 환경영향평가 및 기본설계를 마치고 실시설계를 착수하였으며, “인천만 조력발전소”는 타당성 조사를 마쳤고, 최근에는 ‘석모도 조력발전소’는 기술적 경제적 예비타당성 조사가 이루어졌으며, 새만금, 아산만, 천수만 등에서도 조력발전소 건설이 적극적으로 검토되고 있다.

지금까지 조류발전을 위해서는 섬과 주위 육지 사이의 좁은 해협 등에서 조류가 빠른 지역, 즉 전형적으로 대조기일 때 평균 속도가 2m/s 이상인 곳에서 적용가능성이 검토되었다. 하지만 조력발전은 이미 실용화된 반면 조류발전은 세계적으로 본격적인 대규모 발전이 드문 실정이다. 이는 조류발전이 가능할 정도로 빠른 해수가 흐르는 자연적인 해역이 세계적으로 아주 제한되어 수차발전기를 설치할 적합한 장소를 찾기가 쉽지 않았기 때문이다. 뿐만 아니라 해수의 평균속도가 만족스럽다 하더라도 조류발전소가 설치되는 지역의 해저지형 조건에 따라 해수의 속도분포가 불균일하고, 해수의 흐름 방향이 일정하지 못할 경우에는 수차발전기의 구조적 안전성 확보 및 신뢰성 있는 발전량 조절이 어려운 단점이 있다⁽⁷⁾.

3. 조력발전과 연계한 해류발전단지

일반적으로 자연상태에서 얻을 수 있는 조류는 속도가 2.0m/s 내외이고 자주 흐름의 방향이 바뀌며 해저지형의 영향을 많이 받는다. 하지만 조력발전소에서 얻을 수 있는 해수의 흐름은 자연상태의 조류조건보다 더 균일하고 이용가치가 높은 운동에너지를 포함한다. 본 논문에서는 현재 우리나라에서 건설 중인 “시화호 조력발전소”의 예를 들어 설명하고자 한다.

3.1 해수 순환 메카니즘



Fig.1 Bird view of SIHWA Tidal Power Plant at completion

시화호 조력발전소의 운영계획⁽⁹⁾을 보면 단류식 창조식인 시화호 조력발전소는 창조시 수차발전기를 구동시켜 발전한다. 이때 수문과 구배수갑문은 닫힌 상태에서 해수의 유입은 수차발전기만을 통해서 일어난다. 또한, 해수의 유입은 호수의 관리수위인 E.L.(-)1.0m까지만 허용되며, 호수의 수위가 관리수위에 도달하면 발전은 멈춰진다. 조수가 밀물로 바뀌면서 해수의 수면이 호수의 관리수위보다 낮아질 때 수문을 열어 호수의 물을 외해로 배출한다. 이때 정지상태의 수차발전기 로터 사이를 통해서도 일부 해수가 외해로 빠져나간다. 하루 12시간 24분 주기로 발전과 배수를 반복한다.

3.2 수치해석 및 수리모형실험 결과

“시화호 조력발전소 건설공사 수치해석 및 수리모형실험 보고서⁽⁹⁾에 의하면, 아래 표 1에서와 같이 창조시 수두차 6.0m로 발전할 때 수차 전면에서 해수의 유속은 1.5~2.0m/s, 출구쪽 준설사면의 시작부근에서 3.0~5.0m/s인 것으로 나타났으므로 수차발전기를 지난 뒤 호수로 보내지는 방출수의 평균속도는 3.0m/s 이상이고, 낙조시 낙차 1.9m로 배수할 때 호수측 수문 입구에서는 5.0m/s 정도, 수문 출구에서는 7.0m/s 이상, 수문측 날개벽 끝에서 6.0m/s 정도가 나타나는 등 수문을 통해 해측으로 배출되는 해수의 속도는 6.0m/s 이상인 것으로 나타났다.

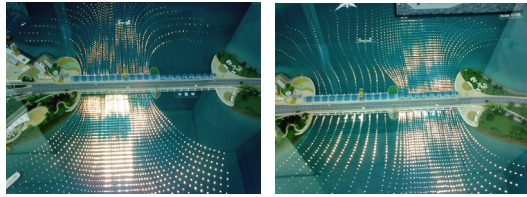


Fig. 2 Image views at power generation(left) and at seawater discharge(right)

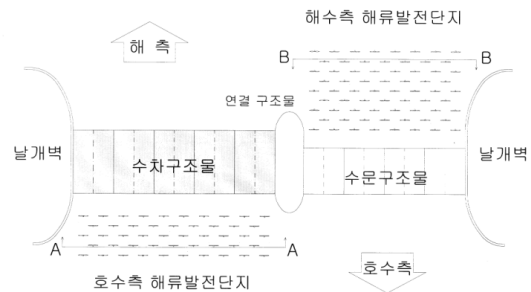
3.3 해류 수차발전기 배치

해류 수차발전기는 수차발전기 뒤로 지나가는 해류의 속도를 느리게 하며, 수차발전기 뒤쪽에 상당한 난류를 가지는 긴 해류 꼬리를 만든다. 따라서 해류발전단지를 구성하는 해류 수차발전기의 배치는 이상적으로는 해류의 주방향뿐만 아니라 해류의 흐름과 직각인 방향으로도 가능한 멀리 떨어지게 수차발전기를 배치하는 것이 좋지만 해저의 이용공간과 수차발전기를 전력망에 연결하는 비용 때문에 서로 가깝게 배치하게 된다⁽¹⁰⁾.

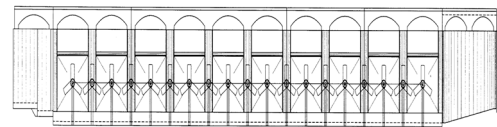
시화호 조력발전소와 해류발전단지를 연계하는 통합발전시스템의 경우, 앞에서 설명한 바와 같이 조력발전소의 수차발전기 후류에서 얻을 수 있는 해류속도는 3.0m/s 이상이고, 수문 후류에서의 해류속도는 6.0m/s 이상으로, 이들은 통상적으로 조석간만의 차에 의해 얻을 수 있는 자연상태의 조류속도보다 훨씬 더 높을 뿐만 아니라 속도분포 및 흐름방향도 자연적인 조류의 것보다 더 균일하므로, 본 논문에서의 해류발전단지

에서는 자연조건의 조류발전단지에서 보다 해류 수차발전기의 배치를 더욱 유리하게 할 수 있다.

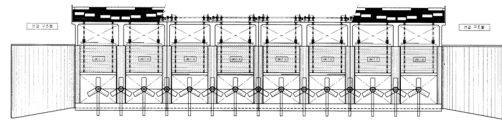
시화호 조력발전소와 연계한 해류발전단지에서 설치 가능한 해류 수차발전기는 조력발전소 수차발전기의 출구 크기와 해저지형 등을 고려할 때 해류 수차발전기의 날개지름은 8~12m 정도가 적절하다. 또한 조력발전소 전후의 해역에서의 해류속도는 3.0~6.0m/s로써, 전체 해류발전단지에 날개지름이 10m인 해류 수차발전기를 주 해류방향과 해류 방향의 직각방향으로 날개지름과 같은 거리만큼 등거리로 설치하되 전후로는 엇갈리게 대각선 방향으로의 배치를 가정할 경우 조력발전소 수차구조물 후방 호수측 해류발전단지에서는 해류 수차발전기 48기를 5열로 배치하고, 수문구조물 후방 해측 해류발전단지에서는 68기를 10열로 배치할 경우, Fig. 3과 같은 통합발전시스템이 가능하다.



a. Top View of integrated power system



b. View from A-A



c. View from B-B

Fig. 3 Layout of ocean current power parks connected with tidal power plant

다음 Fig. 4와 5에서는 호수측 해류발전단지와 해측 해류발전단지의 상상도를 보여주고 있다.

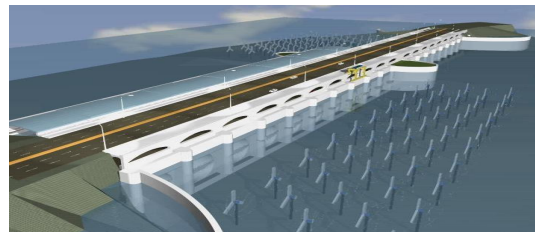


Fig. 4 Image of turbine structures and an ocean current power park at the lake side

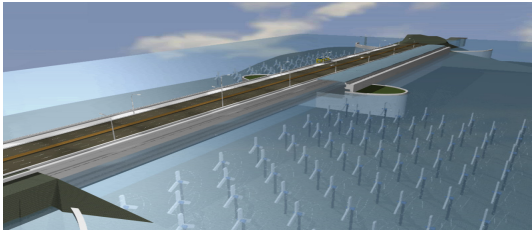


Fig. 5 Image of sluice structures and an ocean current power park at the sea side

해류 수차발전기의 배치는 해저지형에 따라 변경될 수 있지만 풍력발전단지과 마찬가지로 해류 수차발전기는 수차 하류 주위로 과도한 난류가 발생하는 것을 피하고 뒤에 배치되는 수차발전기의 에너지 손실이 앞의 것에 비해 5%를 넘기지 않도록 배치하는 것을 기준으로 한다⁽¹⁰⁾.

3.4 해류발전단지의 발전량 예측

아래 Table 1은 Albert Ruprecht⁽¹¹⁾가 날개 2개짜리인 프로펠러 형식의 수차발전기에 대하여 적용한 조류의 통과단면적(A, m²), 조류속도(V, m/s)에 대한 발전량의 관계를 나타낸 것이다.

Table 1 Power generated in response to rotational area and velocity of turbine blades

지름, m	속도, m/s	발전량, kW
10.00	2	130.49
	3	440.40
	4	1043.92
	5	2038.91
	6	3512.04

$$\text{Kilowatt Power} = C_{p\text{ideal}} \times 0.5 \times \eta \times \rho \times A \times V^3$$

시화호 조력발전소는 단류식 창조식으로 하루 2번 발생하는 대조기에만 발전한다. 하지만 본 논문이 제안한 해류발전단지는 대조기에는 조력발전소 수차발전기와 함께 발전하고, 조력발전소가 발전을 하지 않는 소조기에도 수문구조물의 수문을 통해 배출되는 해류를 이용하여 발전할 수 있다.

Fig. 3과 같이 배치한 해류발전단지에서 Table 1의 결과를 적용하면, 해류의 정격속도 3.0m/s인 호수측 해류발전단지의 경우 약 21MW, 6.0m/s인 해측 해류발전단지의 경우 약 238.8MW, 총합계 259.8MW라는 발전시설용량을 얻을 수 있다. 이것은 현재 건설중인 시화호 조력발전소의 발전시설용량인 254MW와 비슷한 수준이다. 물론 이와 같은 수치의 정확성을 위해서는 앞으로 컴퓨터 시뮬레이션을 비롯한 보다 체계적인 연구가 필요할 것이다.

4. 결론

본 논문은 조력발전소의 수차발전기와 수문을 통과한 뒤 방출되는 해수의 흐름을 이용하여 발전하는 해류발전단지에 관한 것으로서, 조력발전소 수차발전기에서 발전에 사용한 후 호수측으로 무용

하게 흘러보내는 해류와 수문구조물의 수문을 통하여 바다로 배출되는 해류에는 여전히 많은 유효한 에너지를 함유하고 있으며, 다수의 해류 수차발전기를 적절하게 배치함으로써, 시화호 조력발전소의 발전시설용량과 비슷한 규모의 해류발전단지가 가능하다는 것을 보였다.

후 기

본 논문에서 예로써 보인 시화호 조력발전소는 단류식 창조식 발전을 하기 때문에 조력발전소 수차발전기 후방과 수문의 후방에만 해류 수차발전기를 배치·적용하였으나 조력발전의 방식에 구애받지 않고 배출되는 해수의 속도가 2m/s 이상인 곳이면 해류발전단지의 적용을 검토할 수 있으며, 조력발전과 해류발전을 겸하는 통합발전시스템 경우 조력발전 또는 해류발전 단독건설인 경우에 비해 경제적으로 대단히 큰 효과를 얻을 수 있으므로 투자자나 개발자들로 하여금 조력발전과 해류발전에 대한 관심을 새로이 불러일으킬 것으로 기대된다.

특히, 최근 들어 한국동서발전(주), 한국남동발전(주) 그리고 한국중부발전(주) 등 발전회사들이 서해안을 중심으로 한 대형 조력발전소 건설계획이나 남해안을 중심으로 한 대규모 조류발전단지 건설계획을 연이어 발표하고 있다. 희망하건데, 본 논문이 제시하는 조력발전과 해류발전을 겸하는 통합발전시스템은 앞에서 추진중인 모든 계획들의 경제성을 크게 증대시켜 줄 수 있을 뿐만 아니라 국가 미래에너지 확보에 크게 일조할 수 있을 것이므로 이들 계획에 반영될 수 있기를 기대해 본다.

References

- [1] 에너지관리공단, 2007. 신재생에너지 RD&D 전략 2030[해양].
- [2] 장경수, 이정은, “조력발전소 수차구조물 및 수문구조물의 방출수를 이용한 해류발전”, 한국전산유체학회학술대회논문집, 180-183.
- [3] 장경수, 이정은, “조력발전소와 연계한 해류발전”, 2008년 한국풍력에너지학회 춘계학술대회, 광주 김대중 컨벤션센터, 2008.04.08-09.
- [4] 정중화, 김양근, 2007. 조력발전 기술현황 및 전망, 한국태양에너지학회지, 6권 1호, 3-8.
- [5] 조철희, 2007. 조류발전 특성과 국내외 기술개발 동향, 한국태양에너지학회지, 6권 1호, 9-16.
- [6] Francis Akwensivie, 2006. In the wake of marine current turbine, MS Thesis, University of Strathclyde, London.
- [7] "Tidal Power", University of Strathclyde in Glasgow, England, www.esru.strath.ac.uk
- [8] 한국수자원공사, 2005. 시화호 조력발전소 건설공사 관리부문계획서.
- [9] 한국수자원공사, 2004. 시화호 조력발전소 건설공사 수지해석 및 수리모형실험 보고서.
- [10] "Wind Power" DWIA, www.windpower.org
- [11] Albert Ruprecht, 2007. Development of a tidal power plant.