Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 18, No. 12 pp. 112-117, 2017

https://doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.12.112
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

환경영향을 저감한 신형 조력발전기술 적용성 검토

박영현[1], 윤대옥[2*]
[1]한국해양과학기술원 연안공학연구본부, [2]충북대학교 지구과학교육과

Applicability of a new tidal power system with reduced environmental impact

Young Hyun Park[1], Daeok Youn[2*]
[1]**Coastal Development Res. Dept., Korea Institute of Ocean Science and Technology**
[2]**Department of Earth Science Education, Chungbuk National University**

요 약 최근 10 여 년간 신재생 에너지 개발에 대한 관심이 급증하고 있으며, 한국의 서해안은 전 세계에서 조력발전이 가장 유리한 지역 중 하나이다. 방조제 방식의 조력발전은 오랜 기간 동안 설치 및 운영을 거쳐 조력발전을 대표하는 방식이지만, 여러 환경영향을 이유로 향후 조력발전 사업 추진이 지연되거나 중단되고 있는 상황이다. 이런 이유로 본 논문에서는 기존의 방조제 방식이 가지는 환경영향을 최소화한 신형 조력발전 기술을 서해안 조력발전 후보지에 적용하고 가능성을 분석하였다. 신형 조력발전 기술은 Dynamic Tidal Power (DTP)로 불린다. 신형 조력발전 기술의 검증은 실험실이나 현장에서는 불가능하므로 수치해석 프로그램을 사용하였다. 신형 조력발전 기술은 해안으로부터 수십 km의 둑을 설치한 후, 둑의 양측에서 회절에 의해 발생하는 위상차를 이용하여 발전을 하게 된다. 이론상으로는 조차의 2배에 가까운 발전을 할 수 있어, 조차가 작은 지역에도 적용 가능할 것으로 예상된다. 방조제 방식과 달리 바닷물을 가둘 필요가 없어 환경영향을 줄일 수 있는 장점을 가지고 있다. 한국의 서해안의 경우 조위차가 크고, 대도시가 인접하고 있어 적합한 후보지로 생각된다.

Abstract Interest in the development of renewable energy sources has been increasing over the past 10 years and the west coast of Korea is one of the most favorable regions for tidal power. Barrage type tidal power is representative of the experience of installation and operation of such power sources for long periods. However, future projects for barrage type energy sources are either delayed or closed due to their environmental impact. For this reason, we applied a new tidal power technology with minimized environmental impact to a candidate area in the west coast and then analyzed its feasibility. The new tidal power technology is called Dynamic Tidal Power (DTP). Because its verification is impossible both in the laboratory and field, a numerical model is used for the evaluation of DTP. This new technology produces tidal power by means of the phase difference caused by diffraction on both sides of a dike built tens of km away from the coast. Because DTP is theoretically able to almost double the tidal range, it is expected to be applicable to even a small tidal area. Unlike the barrage type, it has the advantage of reducing the environmental impact by not enclosing the sea water. The west coast of Korea is close to the metropolitan area and has a high tidal range and, thus, it is thought to be a suitable candidate for tidal power.

Keywords : Tidal power, Dynamic Tidal Power, Renewable energy, Numerical model, Environmental impact

1. 서론

최근 들어 전 세계적인 이상기후로 인해 신재생에너지 개발에 대한 관심이 점차 높아지고 있다. 대표적인 신재생 에너지는 태양에너지, 풍력, 수력, 조력, 파력, 지열, 해수 온도차 등이 있으며, 한국의 서해안은 높은 조위차

본 연구는 한국해양과학기술원(KIOST)의 “조류에너지 융복합 발전기술 개발(PE99521)”의 연구비지원에 의해 수행되었음. 윤대옥 교수는 2015년도 충북대학교 학술연구지원사업과 정부(교육부) 재원인 한국연구재단 기초연구사업(2015R1D1A3A01020130)의 지원을 받았음.

*Corresponding Author : Daeok Youn(Chungbuk National Univ.)
Tel: +82-43-261-2738 email: dyoun@chungbuk.ac.kr

Received November 3, 2017 Revised (1st November 14, 2017, 2nd November 28, 2017)
Accepted December 8, 2017 Published December 31, 2017

와 낮은 수심으로 전 세계적으로 조력발전이 가장 유망한 지역 중에 한 곳으로 알려져 왔다 (Table 1). 이런 이유로 한국은 오래전부터 조력발전에 대한 연구를 수행해 왔으며, 마침내 국내 최초이며 세계 최대 용량의 시화호 조력발전소를 2004년 12월에 착공하고 2011년 8월에 완공하여 현재 성공적으로 운영 중에 있다.

조력에너지는 지구의 자전과 달의 공전에 의해 발생하는 이유로 매우 정확한 주기를 가지고 있으며, 다른 신재생에너지에 비해 발생 에너지의 크기를 예측할 수 있는 장점을 가지고 있다. 에너지 부산물이 발생하지 않아서 친환경적이며, 에너지 발생은 반복적, 주기적이며 무한하다. 이러한 장점에도 불구하고 조력발전소의 경우 큰 규모의 발전시설이 필요하여, 이에 따른 환경영향이 발생하지 않을 수 없다. 바닷물을 방조제에 가두어 발생하는 낙차를 이용하는 조력 발전의 경우에는, 가둔 물의 흐름이 정체되어 발생하는 생태계의 변화뿐만 아니라 퇴적물이 누적되는 환경영향을 야기할 수 있다.

전 세계에서 조력발전을 할 수 있는 지역은 매우 제한되어 있다. 이러한 천혜의 자연 조건을 환경문제를 이유로 포기하기에는 아쉬운 상황이며, 최대한 친환경적인 발전방식을 개발하여 환경영향을 최소화 할 수 있는 새로운 돌파구를 찾아야 할 필요가 있다.

본 연구의 목적은 1997년 네덜란드 연구진에 의해 기본 개념이 제시되었으나, 모형실험 및 현장 검증의 어려움으로 초기단계의 연구수준을 벗어나지 못한 Dynamic Tidal Power (DTP)를 한국의 서해안에 적용하여 가능성을 분석하려 한다. 이를 위해 수치모델을 사용하여 조력발전을 위한 조위차 발생과 태풍시 DTP의 성능을 분석하였다.

Table 1. The highest tidal range in the world

Name	Highest tidal range (m)
Bay of Fundy, Canada	16.3
Severn Estuary, UK	15
Rance, France	13.5
Inchon, Korea	9.5

2. 조력발전

2.1 조력발전 개요

물의 밀도는 공기 밀도의 약 820배 이상 큰 이유로 동일 규모의 터빈이 사용되었을 경우 조력에 의한 발전 밀도는 매우 크며 그 만큼 매력적인 천연 에너지 자원이다. 조력에너지는 약 24시간 50분의 주기를 가지고 있어, 매일 50분씩 늦어지게 된다. 한국의 서해안은 하루 동안 두 번의 고조(high tide)와 저조(low tide)가 발생하는 Semidiurnal 형태를 보여준다. Semidiurnal의 경우 이론적으로 하루 네 번의 발전이 가능하다. 한 달 동안 매일 고조와 저조의 크기가 변화하며, 이중 가장 큰 두 개의 고조와 가장 작은 두 개의 저조를 갖게 된다. 가장 큰 두 개의 고조를 대조(spring tides)라고 하며, 가장 작은 두 개의 저조를 소조(neap tides)라고 한다. 대조와 소조는 일주일 간격으로 반복하여 발생한다. 이런 주기적인 특성을 이용하여 조력 발전을 개발한다.

조력에너지는 크게 조위차를 이용한 조력발전과 조류를 이용한 조류발전으로 구분된다. 조위는 지형의 영향을 다소 받지만, 주기성으로 인해 비교적 정확하게 예측이 가능하다. 반면에 조류는 지형의 영향이 매우 큰 이유로 정확한 예측이 어렵다. 본 연구에서는 조위차를 이용한 조력발전에 대한 연구를 수행하였다.

조력발전은 발전 구조물의 특성에 따라 Tidal barrage, Tidal stream, Tidal lagoon, Dynamic Tidal Power로 구분할 수 있다. Tidal barrage는 강의 하구 또는 바다의 만에 댐과 같은 구조물을 설치하여 가두어진 물로 발전을 하는 방식이며, Tidal stream은 조류가 빠른 지역의 바닥에 프로펠러 형상의 발전기를 설치하여 발전하는 방식이다. Tidal lagoon과 Dynamic Tidal Power는 Tidal barrage보다 친환경적이며 아직까지는 이론상에서만 존재하는 발전 방식이다.

우리나라의 조력발전 대상지역은 서남해안이며, 인천, 충청지역은 낙차를 이용하는 조력발전, 전라도 지역은 빠른 조류를 이용하는 조류발전에 유리하다 (Fig. 1).

2.2 Tidal barrage

Tidal Barrage는 가장 오래되었으며 현재까지 전 세계에서 가장 많이 적용된 방법으로, 1966년에 완공되어 45년간 전 세계에서 가장 큰 발전용량을 자랑하던 프랑스의 Rance와 시화호조력발전이 이런 발전방식을 따르고 있다. 국내에서 조위차가 가장 큰 지역에 위치한 시화호조력발전소는 1994년 방조제를 완공하여 민물 담수호로 시작되었으나, 이후 지천으로부터 오염물질 유입으로

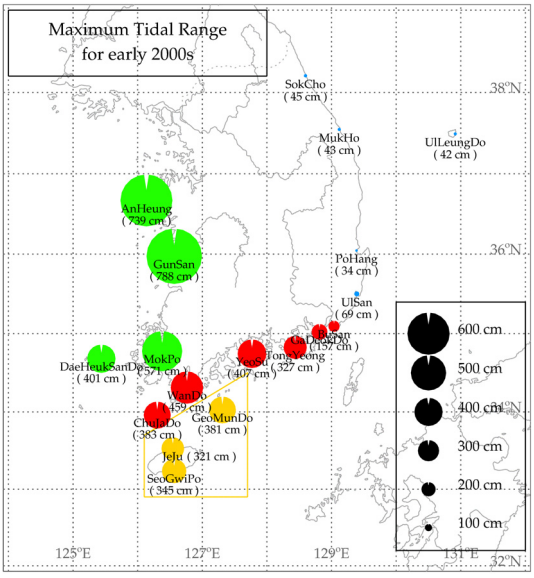


Fig. 1. Maximum tidal range along the Korean Peninsula for early 2000s (unit is centimeter)

인해 죽음의 호수로 변하였고, 이후 수질 개선을 목적으로 지금과 같은 조력 발전소로 변환하게 되었다. Tidal barrage의 단점으로는 우선 막대한 건설비용을 들 수 있다. 환경적인 문제점으로는 해수교환이 저하되어 방조제 내부의 수질 및 염도가 저하되며 퇴적물이 침하된다. Frid 등[1]은 조력과 파력발전 장치가 환경에 미치는 다양한 영향을 소개하였다.

3. Dynamic Tidal Power

Tidal lagoon과 DTP는 Tidal barrage 방식에서 발생되는 환경문제들을 저감하도록 제안된 발전방식으로 본 연구에서는 DTP의 특성을 분석하였다. DTP의 초기 아이디어는 1996년 네덜란드 학자로부터 제안되었으나, 모형실험 및 현장관측이 불가능한 이유로 한동안 아이디어 차원에서만 논의되었다 [2]. 이후 수치해석 프로그램의 발달로 DTP 아이디어는 시뮬레이션을 통해 검증되었다.

DTP의 이론적인 배경은 Buchwald의 논문 [3]에 근거를 두고 있다. 이것을 DTP 이론에 직접 적용하기는 쉽지 않으나, Mei [4]는 tidal diffraction 효과에 착안하여 DTP와 같은 형상에 적용할 수 있는 이론을 제안하였다.

DTP는 Fig. 2와 같이 해안선으로부터 직각으로 수십 km 이상 뻗어 나온 구조물에 의해 발생하는 수위차를 이용한 조력발전의 한 종류이다. 그림에서 파란색의 구조물 아래쪽은 수위가 낮고, 초록색의 구조물 위쪽은 DTP로 인해 수위가 높게 되어 수위차가 발생한다. 이때 구조물에 설치된 발전용 터빈을 해류가 빠르게 통과하며 전력을 생산하게 된다. 그림과 같이 T-shape은 수위차를 좀 더 높이기 위해 고안된 형상이다.

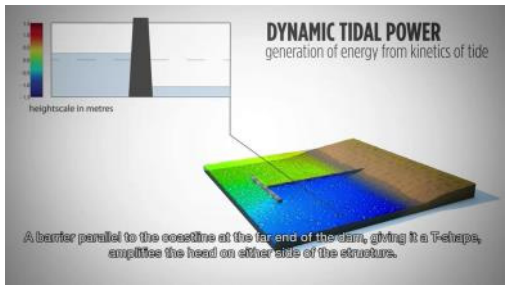


Fig. 2. Concept of DTP with T-shape structure [5]

4. 적용성 검토

4.1 DTP 검증

수치모델을 사용하여 한국 서해안에서 DTP의 적용 가능성을 검토하였다. 수치모델은 미육군공병단에서 개발된 조석에 의한 해수운동을 시뮬레이션 하는 ADvanced CIRCulation model (ADCIRC) 모델[6]을 사용하였으며, 30일 동안의 조위차 변화를 관찰하였다. 수치모델 사용을 위한 조위 시뮬레이션의 정확도는 Park 등의 논문[7]에서 이미 검증하였다.

ADCIRC을 사용하여 검토하려는 부분은 크게 두 가지이다. 첫째는 DTP를 사용하여 발생되는 조위차와 발생원리 분석, 두 번째는 태풍시의 특성 변화를 검토하려 한다. 이를 위해 Fig. 3과 같이 T-shape이 없는 50 km의 막대형 DTP를 계산 격자에 포함한 후 시뮬레이션을 실시하였다. DTP의 북쪽과 남쪽에 각각 3개의 관측점을 설치한 후 30일 동안의 조위 변화를 관측하였다. 관측점은 DTP의 끝부분, 중간부분, 육지와 연결된 부분 3지점이며, 바다로부터 육지방향으로 1, 2, 3 으로 표시하였다.

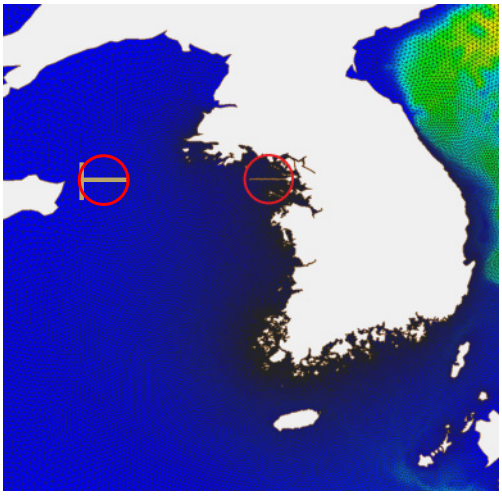


Fig. 3. Computational grid for DTP simulation and DTP in the circle

DTP에 의한 각 관측점의 조위 변화는 Fig. 4-6에 나타내었다. 해안에 가까운 북쪽 3번 관측점에서 DTP에 의한 조위 변화를 DTP가 없는 경우와 비교하였다 (Fig. 4). DTP에 의해 조위의 상당부분이 감소하였으며, 위상차가 발생하였다.

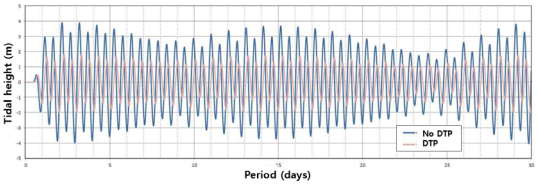


Fig. 4. Comparison of tidal height with or without DTP

DTP에 의한 조위차를 분석하고자, DTP 남북의 관측점에서의 조위를 확대하여 Fig. 5 에 나타내었다. 해안에 가까운 관측점 (N3와 S3)에서는 DTP에 의한 위상차가 극대화 되어 약 4시간 정도의 시간차가 발생하였으나, DTP의 가장 먼 바다 쪽에 위치한 관측점 (N1과 S1)에서는 약 40분 정도의 시간차가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

예를 들어 기존의 Tidal barrage 방식의 경우 4 m의 조위차를 발생하기 위해 막대한 양의 바닷물의 수문을 사용하여 가두어야 한다. 하지만, DTP의 경우는 바닷물을 가둘 필요가 없으며, 조력발전을 위해 Fig. 5 그래프에서 3.4일에 기록된 N3와 S3간의 약 4 m의 조위차 (Tidal difference)를 사용하여 발전한다. DTP에 의한 조위는 감소하였지만, 위상차에 의한 조위차가 최대 4 m 정도 발생하는 것을 확인할 수 있다. 반면에 같은 시간 N1과 S1 에서는 조위차가 약 0.7 m 발생한다.

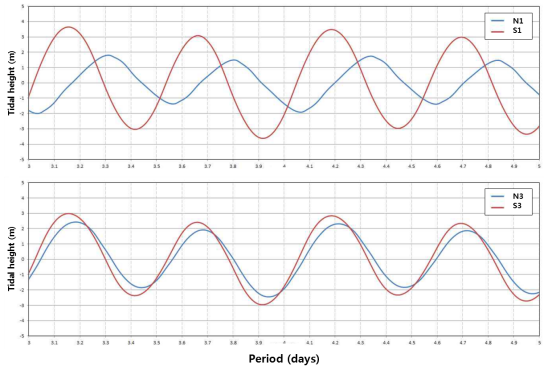


Fig. 5. The observations of tidal height by DTP (upper: N3 and S3, lower: N1 and S1)

길이 50 km의 DTP의 끝 (1), 중간 (2), 해안쪽 (3)에 설치된 관측점의 조위를 시뮬레이션을 한 후 DTP의 북쪽 조위에서 남쪽 조위를 뺀 값 (N1-S1, N2-S2, N3-S3)을 Fig. 6에 나타내었다. DTP에 의한 최대 조위차는 해안쪽은 ± 4 m, 중간은 ± 3 m 이지만, 끝부분에서는 ± 1 m 정도로 작아지는 것을 볼 수 있다. Fig. 4에서 한 달 동안의 조석의 변화와 같이, Fig. 6의 DTP에 의한 조위차도 비슷한 형상을 보여준다. 세 곳의 관측점의 위치에 따라 다른 조위차를 보여주기는 하지만, 세 곳 모두 동일한 시각에 최대 및 최소 조위차를 보여주는 결과를 보면 DTP에서의 위치와 상관없이 위상차는 동일한 것으로 생각된다.

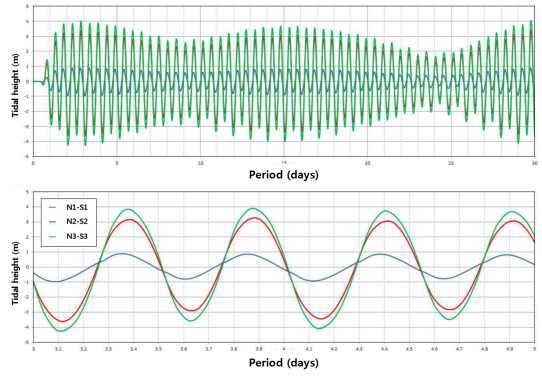


Fig. 6. The observations of tidal difference by DTP

DTP의 길이에 따라 위상차가 다르게 발생하는 특성을 활용하면, 이론적으로 6시간 (90도 위상차) 차이에서는 최대 약 6 m의 조위차를 발생할 수도 있다. 우리나라의 서해안은 하루에 고조와 소조가 2번씩 발생하는 Semidiurnal인 이유로 양방향 발전인 복류식인 경우 하루에 4번 발전이 가능하다. 하지만, Tidal barrage의 경우 매일 50분씩 늦어지는 조석 주기를 고려하여 수문 개폐 시간을 조정해야 하며, 바닷물을 가두어 조력 발전을 효율적으로 수행하기 위해서는 조석 변화에 따른 복잡한 시스템을 필요로 한다.

4.2 태풍시 DTP

우리나라는 태풍의 이동경로에 위치하여 해마다 1-2회 이상 직접적인 피해를 입는다. 특히 서해안은 수심이 낮아 대조시 태풍에 의한 영향이 매우 큰 이유로, 태풍시 DTP를 시뮬레이션 하였다.

태풍 시뮬레이션을 위해서는, DTP 시뮬레이션에 사용된 ADCIRC 모델에 Planetary Boundary Layer (PBL) 모델을 병합하여 수행하였다. 시뮬레이션에 사용된 태풍은 2000년 8월 31일 서해안의 수도권에 큰 피해를 입힌 Typhoon Prapiroon을 사용하였다. Prapiroon의 이동경로가 DTP와 매우 가까워 안정성 검토에 적합하다고 생각된다.

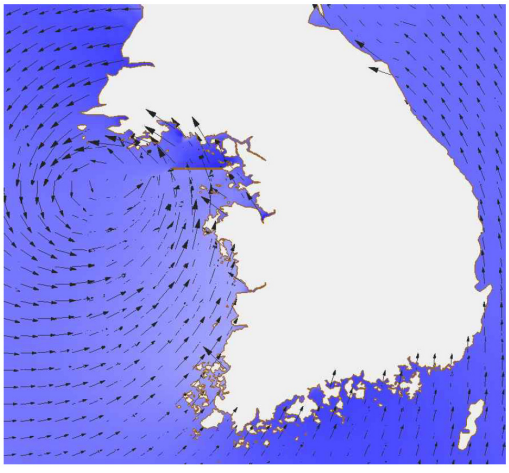


Fig. 7. Simulation of Typhoon Prapiroon by ADCIRC and PBL model

태풍은 Fig. 8의 그래프에서 날짜가 3.275일 때 DTP에 가장 가깝게 위치하였다. 시뮬레이션을 안정적으로 시작하기 위해 1.5일간 ramp function을 사용하였으며, 이 기간 동안은 조위가 조금씩 상승하였다. 태풍에 의한 폭풍해일의 영향으로 조위가 ± 1 m 정도 상승하였으며, 이에 따른 DTP의 조위차는 7 m까지 증가하였다. 태풍에 의해 증가한 조위차에 의해 터빈을 지나는 유속도 빨라지게 됨으로, 이에 따른 터빈과 구조물의 보강도 필요할 것으로 생각된다.

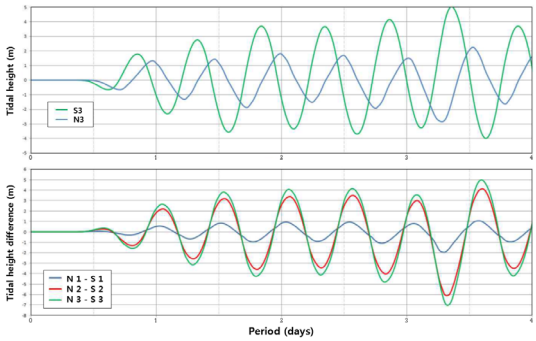


Fig. 8. Tidal variations by DTP and Typhoon Prapiroon

5. 결론

기존 Tidal barrage 방식의 조력발전이 유발하는 환경영향을 저감할 수 있는, 새로운 방식의 조력발전 방식을 국내 서해안에 적용해 보았다. 그동안 이론적으로만 연구된 새로운 조력발전 방식은 DTP라고 하며 바닷물을 가두지 않기에 이에 따른 환경영향을 저감할 수 있다. 기존 DTP 연구가 단순히 발전량 산출에 주목하였던 것에 비해, 본 연구에서는 발전량을 결정하는 주요 요소인 DTP에 의한 조위차와 위상차의 상관관계를 좀 더 이론적으로 분석하였다. 실제 발생할 수 있는 현장 문제에 대한 검토를 위해 한국 서해안의 상황을 고려하여 태풍에 의한 영향도 함께 분석하였다.

DTP는 해안으로부터 먼 바다 쪽으로 길게 뻗은 구조물에 의한 조석의 회절효과를 이용하며, 회절에 의한 위상차는 바다쪽에서 해안쪽으로 이동할 수록 점차 증가한다. 특성을 분석하기 위해 사용된 길이 50 km의 DTP의 경우 약 4시간의 시간차가 발생하며, 우리나라의 서해안이 Semidiurnal인 것을 고려하면 이론적으론 6시간의 시간차에서 최대의 조위차가 발생하게 된다.

한 달 동안의 시뮬레이션을 분석한 결과, DTP에 의해 동일 지점에서는 조위가 변화하더라도 위상차는 한 달 동안 동일한 것을 확인할 수 있었다. 따라서 이에 따른

추가 관리 시스템은 필요하지 않아 단순한 조력발전 시스템을 구성할 수 있을 것이다. 태풍에 의한 변화는 단지 폭풍해일로 인한 조위 및 조위차의 증가이며, 위상차의 변화는 발생하지 않는 것을 확인할 수 있었다. 증가한 조위차는 터빈을 통과하는 유속을 증가시킴으로 터빈 및 구조물의 추가 보강이 고려되어야 한다.

DTP는 한국의 서해안에 적용하기에 매우 적합한 매력적인 신재생에너지이지만, 막대한 시설과 건설비로 인해 가까운 미래에서는 실용화가 어려울 것으로 생각된다. 이에 따라 DTP 구조물의 경제성을 높이기 위한 다양한 활용방법이 같이 연구되어야 할 필요가 있다.

References

[1] C. Frid, E. Andonegi, J. Depestele, A. Judd, D. Rihan, S. Rogers, E. Kenchington, "The environmental interactions of tidal and wave energy generation devices", *Environmental Impact Assessment Review,* 32, pp. 133-139, 2012.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.eiar.2011.06.002

[2] K. Hulsbergen, R. Stejin, G.V. Banning, G. Klopman, "Dynamic Tidal Power (DTP) - A new approach to exploit tides", *2nd International Conference on Ocean Energy,* 2008.

[3] V.T. Buchwald, "The diffraction of tides by a narrow channel", *Journal of Fluid Mechanics,* 46, pp. 501-511, 1971.
DOI: https://doi.org/10.1017/S0022112071000661

[4] C.C. Mei., "Note on tidal diffraction by a coastal barrier", *Applied Ocean Research,* 36, pp. 22-25, 2012.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.apor.2012.01.005

[5] Power Programme. The POWER programme [Internet]. POWER Programme, c2012, Available From: http://www.powerdtp.nl/home/default.aspx.(accessed May, 23, 2016)

[6] The university of North Carolina. The official ADCIRC web site [Internet]. The university of North Carolina, c2008, Available From: http://www.adcirc.org/. (accessed May, 23, 2016)

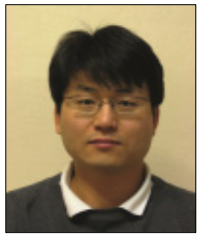
[7] Y.H. Park, K-D Suh. "Variations of storm surge caused by shallow water depths and extreme tidal ranges", *Ocean Engineering*, 55, pp. 44-51, 2012.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2012.07.032

박 영 현(Young Hyun Park) **[정회원]**

- 2000년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2006년 12월 : Texas A&M Univ. (공학박사)
- 2010년 7월 ~ 2012년 1월 : 삼성물산 건설부분 과장
- 2012년 2월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 책임연구원

<관심분야>
해안침식, 해양에너지, 해양구조물, 유체역학

윤 대 옥(Daeok Youn) **[정회원]**



- 1997년 2월 : 서울대학교 대기과학과 (이학석사)
- 2006년 2월 : 서울대학교 지구환경과학부 (이학박사)
- 2001년 12월 ~ 2002년 12월, 2005년 5월 ~ 2008년 5월 : Univ. of Illinois at U-C 연구원
- 2010년 10월 ~ 2012년 8월 : 한국환경정책·평가연구원 책임연구원/부연구위원
- 2012년 9월 ~ 2015년 9월 : 충북대학교 지구과학교육과 조교수
- 2015년 9월 ~ 현재 : 충북대학교 지구과학교육과 부교수

<관심분야>
지구물리유체역학, 대기화학, 대기환경, 신재생에너지