

파랑 에너지의 경제성

한국과학기술정보연구원
 전문연구위원 신효순
 (0637shin@reseat.re.kr)

1. 머리말

- 2007년에 유럽 연합(EU)은 CO₂ 배출량의 20%를 감소하고, 에너지 소비의 20%를 감소하기 위해 EU의 총 에너지 소비의 20%를 신재생 에너지로 구성하는 목표를 달성하기 위해, 유럽을 고에너지 효율 및 저온실가스(GHG: Green House Gas) 경제로 변환하기 시작했다.
- 이 정책의 주 초점은 풍력과 태양 에너지에 있었다. 그러나 현재 덜 개발되었지만 전기 생산을 위해 엄청난 잠재력 덕분에 폭넓은 가능성을 제시하는 파랑 에너지 같은 다른 형태의 신재생에너지를 개발하는 것이 필요하다.
- 해양 에너지의 개발에 주 장애는 (1) 해양 에너지 개발의 초기 단계, (2) 파랑 단지의 해안 및 해양에 영향, (3) 파랑 에너지가 비경제적으로 여겨지는 점이다. 이런 의미에서 파랑 에너지의 경제적 평가의 중요성은 아무리 강조해도 지나치다고 할 수 없다.

2. 파랑 단지 비용

- 파랑 에너지 단지의 주 비용은 (1) 가동 전 비용, (2) 건설비용, (3) 가동비용, (4) 해체 비용이다. 가동 전 비용은 예비 연구, 프로젝트, 환경영향 평가, 허락 평가 및 방향과 조정이다. 이 비용을 위해 일반적 가치를 설정하는 것은 설치의 종류, 위치 및 손에 있는 프로젝트의 특수성 때문에 복잡한 과정이다. 흔히 자본 지출의 10%가 고려된다. 재생에너지협회는 500,000~€2,000,000 사이의 범위로 추정한다.
- 다음에는 허가와 면허를 위한 절차와 관련된 비용이 추가될 필요가 있

다. 이들은 파랑 에너지 변환기(WEC: Wave Energy Converter)의 초기 비용의 2%로 추정되거나 미국 달러로 플랜트 전력(W)의 3.7% 즉, 100MW 플랜트의 허가 및 면허비는 \$3.7M(또는 28,000€/MW)이다.

- 초기 비용($C_{initial}$)으로는 파랑 에너지 변환기(WEC: Wave Energy Converter)와 파랑 에너지 플랜트의 다른 필요한 요소와 설치 비용을 포함한다. $C_{initial} = N \times C_{wec} + L_{offshore} \times C_{und.cab.} + L_{onshore} \times C_{subt.cab.} + C_{subest.} + C_{elect.inst.} + C_{mooring}$ 여기서 N은 변환기의 수이고, C_{wec} 는 1대의 변환기와 그 설치비용이고, $L_{offshore}$ 는 해저 전기 케이블의 길이이고, $C_{und.cab.}$ 은 해저 전기 케이블의 단위 길이당 비용이다.
- $L_{onshore}$ 는 현존 전기 네트워크까지의 지하 케이블의 길이이다. $C_{subt.cab.}$ 은 지하 케이블의 단위 길이당 비용이다. $C_{subest.}$ 는 변전소의 비용이다. $C_{elect.inst.}$ 는 전기 설치 비용이고 $C_{mooring}$ 은 계류 시스템과 그의 설치비용이다. WEC 가격은 그의 설치 비용과 관련된 비용과 함께 장비 구매가로 구성된다. 그것은 2.5~6.0M€/설치 MW이다.
- WaveDragon은 수면 위 저수지에 파도를 끌어 올리고 해수가 여러 대의 낮은 수두의 수력터빈을 통해 내려가게 하여 전기로 변환하는 장치이다. Pelamis는 전기를 발전하기 위하여 파랑 운동을 감쇠시키는 파랑 에너지 변환기이다. 이것은 경첩 관절로 연결된 원통형 부분으로 이루어지는 반 잠수 관절형 구조이다. 이들 조인트의 파랑으로 유도된 운동이 평활화 축전기를 거쳐 유압 모터를 통해 고압 유체를 펌핑하는 유압 램에 의해 저항되고 이것이 전기를 생산하기 위해 전기 발전기를 구동한다.
- AquabuOY는 해저에 유연하게 계류된 원통 튜브 내에 삽입된 피스톤과 연결된 부유물로 구성된 플로팅 장치이다. 플로트가 아래 위로 가볍게 까딱 거리면 해수가 피스톤 실린더 조립 체에 의해 가압되고 펌핑된 해수는 전기에너지를 생산하는 터빈을 구동하는데 사용된다.
- 해상 파랑 단지에서 중요한 요소는 계류 시스템이다. 일반적으로 그 비용은 WEC 비용의 10%로 추정된다. 일반적 계류 시스템은 (1) 현수 시스템, (2) 평평한 시스템, (3) TLP 시스템이다. 현수 시스템이 길이가 더 길고 무겁지만 쉬운 설치, 저비용 및 부식에 영향을 덜 받는다.

WEC 간의 간격은 장비 지름의 10배 또는 파랑 길이의 75~100%이다. 해저 케이블의 설치비는 약 0.20€/m이고 선박 비용은 1.87€/m이다.

- 변전소 비용은 11에서 33kV는 1,110,000€이고 11에서 66kV는 1,330,000€이다. 운영 보수 비는 20~35€/MWh이고, 첫 설치 후 10년에 WEG는 유압 실린더 같은 요소의 재도장과 교환이 필요하다. 추정 비용은 초기 투자의 약 4.2%이다. 전체 플랜트는 20년 후에 해체해야 되는데 해체 비용은 초기 투자 비용의 0.5~1%이다.

3. 파랑 에너지의 평준화된 비용

- 재생에너지에 대해서는 육지와 해상 풍력 에너지 비용은 각각 67.68€/MWh와 101.43€/MWh이다. 파랑 에너지 비용은 육지와 해안 근처는 각각 90€/MWh와 140€/MWh이고, 해상 에너지 단지는 180€/MWh에서 490€/MWh이다. 파랑 에너지는 비재생에너지 보다 비싸고 대부분의 재생 에너지 보다 비싸다. 파랑 에너지는 보조금을 받으면 경제적으로 실행 가능하다.
- 파랑 에너지의 경우에 건축 비용의 감소에 가장 큰 기회가 있다. 파랑 에너지 단지의 수익성에 대한 학습 곡선의 영향을 조사한 연구는 많지 않지만 대부분의 연구는 다음 10년 내에 85~90%의 학습률에 동의한다.

4. 파랑 단지에서의 수입

- 파랑 에너지 플랜트의 수익성을 분석하기 위하여 발전될 수입을 결정하는 것이 필요하다. 주요 수입은 전기적 네트워크에 생산되는 에너지의 판매에서 유래하고 이것은 수명 기간 동안 파랑 단지의 최종 전력 P_f 의 적분과 일치한다. 에너지 = $\int_0^T P_f dt$ 여기서 P_f 는 전체 설치의 최종 전력을 나타내고, t 는 시간, 그리고 T 는 서비스 수명을 나타낸다.
- 그러므로 첫 단계는 최종 출력을 결정하는 것이고, 이것은 다음과 같이 계산될 수 있다. $P_f = f_t f_e f_m P_h$ 여기서 P_h 는 유체역학 동력, f_m 은 변환

의 기계적 효율을 나타내고, f_e 는 전기 에너지 변환 효율이고, f_t 는 전기 에너지 송전 효율을 나타낸다. 총 에너지 생산이 계산되면 판매에 의해 발생된 수입은 발전 차액지원제도에 의존하고 이 값은 나라에 따라 크게 변한다. 평균 판매 액은 약 110€/MWh이다.

5. 외부적 효과

- 합의한 배출 물보다 더 줄인 국가는 그들의 약속을 이행하지 않는 국가에게 잉여 탄소 배출권을 판매할 수 있는 가능성을 갖기 때문에 파랑 에너지를 기술의 다른 소스와 비교할 때 탄소 배출물을 피함으로써 얻은 이익을 감안하는 것은 흥미롭다.
- 파랑 에너지의 탄소 배출 물은 생산된 전기의 6gCO₂/kWh인 반면, 스페인의 평균값은 250gCO₂/kWh 이어서 두 값을 비교하면 244gCO₂/kWh이 파랑 에너지 생산에 의해 달성될 수 있고 이것은 1.22c €/kWh로 환산된다.
- 신재생 에너지와 관련된 다른 긍정적 역할은 새로운 직업의 창출이고 경제 구조에 통합이다. 독일의 브레머하펜과 쿡스하펜 항구는 경제 둔화의 단계에 들어갔는데, 두 항구는 해상풍력 에너지의 개발에 의해 재활성화 되었다. 에너지 전문 회사의 주입이나 역동적인 시장에 적용된 회사들의 재변환 때문에 해상풍력 에너지 개발에 의해 활성화되었다. 예를 들면 그 지역에 풍력 단지가 없었지만 약 3,000개의 직업이 이들 장소에서 창출되었다.

6. 풍력과 파랑 에너지가 결합된 시스템의 비용 절감

- 같은 해상 장소에 다른 해양 재생 자원들을 설치하는 장점 획득의 아이디어가 해양 자원의 더 좋은 사용을 달성하는 방법으로 중요성을 얻고 있고, 이 재생에너지를 비용 경쟁적인 선택으로 변화시킨다. 파랑 에너지의 경우 해상풍력 에너지와 결합이 두 재생 에너지 사이의 상승 효과 때문에 강력하게 부상하고 있다.

- 파랑과 풍력 정렬에 다른 가능성들이 있다. (1) 풍력과 파랑 에너지의 장소 공유. (2) 하이브리드 변환기. (3) 에너지 섬이다. 모든 경우에 파랑 생산은 해상풍력의 변동성을 부분적으로 보상해서 이용 가능성을 증가시키고 평활화 한다. 더구나 공동 요소 및 장비 덕분에 MW 설치당 감소된 자본비가 달성될 수 있다.
- 동일한 방식으로, 공유 전략으로 인해 예상되는 유지 보수 작업의 비용 절감과 운전 및 유지보수의 날씨 창을 증가시키는 해상 풍력 단지에 대한 WEC의 차폐 효과와 같은 다른 요소가 예상된다.

7. 결론

- 파랑 에너지의 경제성의 철저한 검토가 제시되었다. 비용과 수입이 설명되었고, 정량화 되었고 이 새로운 재생 에너지의 발전을 위해 장벽이 될 수 있는 다수의 불확실성이 강조되었다. 파랑 에너지 변환기(WEG: Wave Energy Converter)가 파랑 단지의 전체 비용의 매우 중요한 부분인 것이 발견되었다.
- 실제로 다른 재생에너지(태양광 전지, 태양 열)의 경우와 같이 파랑 에너지 자본 비용이 현재 전통적 발전기술(가스, 석탄)의 자본 비용을 초과한다. 그러나 이들 비용은 파랑 단지 배치가 이행될 때, 규모의 경제에 따라 감소할 것으로 예상할 수 있다. 전통적 발전 기술을 위한 상승하는 장기 건설 및 불확실한 장기 연료 비용과 함께 이 사실은 전기 비용의 이전 넓은 간격을 단힘으로 선도 하고 있다.
- 운영과 보수 비도 바다의 설치에 해당하기 때문에 높다. 이들 운전의 중요성은 매우 중요하고, 정기적인 보수가 파랑 단지의 서비스 수명에 걸쳐 생산 능력을 유지하기 위해 필요하다. 그러나 그들의 경제적 평가는 많은 어려움을 제시한다. 하나는 대체 결정에 관계된다. 대체의 필요가 진부화, 조기 서비스 실패, 파괴 때문에 일어날 수 있다. 특히 긴급 보수에 관해서 해야 할 교체 개입의 수와 종류를 예측하기 어렵다.
- 해상 풍력 설치의 경험이 사전 아이디어를 형성하기 위해 사용될 수 있다. 통 털어서 파랑 동력으로부터 발전된 MWh는 현재 전통적 소스

와 대부분의 다른 재생에너지의 MWh보다 더 비싸서 파랑 동력 설치는 오직 보조금에 의해서 특혜를 받는다면 경제적으로 자립할 수 있다.

- 파랑 단지로부터 수입에 관해서는 발전된 에너지의 판매가 당연히 주 수입이다. 이런 의미에서 현재의 변환기는 낮은 성능을 가지고 있어서 그들을 개선하는 것이 파랑 에너지의 경제성에 크게 기여할 것이다. 발전 차액 지원제도는 나라마다 상당히 변하고 파랑 단지의 위치 선택을 위한 가장 중요한 요소이다. 발전 에너지에 추가해서 탄소 배출권 판매에서 나오는 수입이 EU 회원국 같이 교토 의정서를 고수하는 국가에서는 고려되어야 한다.
- 이들 국가는 탄소 배출물의 제한이 적용된다. 한도를 초과하는 국가들은 그 국가의 한도 이하로 배출하는 국가에서 추가로 탄소 배출권을 구입해야 한다. 또한 이들 소득의 직접 소스에 추가해서 파랑 단지의 다른 혜택이 간접 소득의 형태로, 예를 들어, 지역 인프라 개선, 많은 국가에서 계약되는 조선 등 관련 분야의 활성화 및 새로운 일자리 창출이 정량화 될 수 있다.
- 파랑 에너지 보다 일반적으로, 재생 에너지 대 종래 에너지의 경쟁력에 대한 적절한 결론을 도출하기 위하여 이러한 요소들을 경제성 평가로 포함하는 것이 필요하다.

출처 : S. Astariz, G. Iglesias, "The economics of wave energy: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 2015, pp.397~408

◁ 전문가 제언 ▷

- 파랑 에너지는 가장 유망한 재생에너지의 하나이다. 현재 다른 재생에너지보다 덜 개발되어서 파랑 에너지 프로젝트의 현존 비용 추정 모델은 지나치게 단순화 되고, 경제적 평가 결과의 흠어짐이 잠재적 투자자의 신뢰를 깎아내리고 파랑 에너지의 개발에 장애가 된다. 파랑 에너지의 비용을 이해하는 것은 해양 재생 에너지에서 주요 연구 분야의 하나이다.
- 이 연구의 주목적은 보통 간과되는 많은 요소를 포함한 파랑 에너지의 경제적 분석에서 고려되어야 할 모든 요소를 검토하는 것이다. 이 과정에서 저자들은 예비 비용, 건설, 운영, 유지보수 및 해체 비용인 파랑 발전 단지의 직·간접 비용은 물론 장래 수입도 특징지었다. 그들 각각에 대해 계산을 위한 포괄적 공식과 함께 참고 값이 제시되었다. 또한 평준화된 비용 즉 에너지 단위(1kWh)의 생산 비가 여러 에너지 소스 사이에 비교되었고 이들을 근거로 파랑 에너지의 수익성과 경쟁력의 결론이 모아졌다.
- 해상 풍력터빈과 파랑 에너지 변환기(WEC)의 장소 공유가 WEC에 의한 상당한 파랑 높이 감소로 풍력단지 내에 온화한 날씨를 가져왔고 날씨 차이 80% 이상으로 증가했다. 또한 파랑 에너지와 해상풍력 에너지의 결합이 공통적 전기 인프라, 운영 및 유지 보수의 장비와 인력의 공유로 이들 해양 재생에너지의 경제적 실행 가능성을 향상 시킨다.
- 홍익대학교의 김 도영 등은 한국 해역의 파랑 에너지 밀도를 조사했는데 파랑 에너지가 집중하는 달은 12월, 1월 및 2월로 5월과 6월에 비해 상당히 높게 나타났으며 태풍이 발생하는 8월, 9월 및 10월은 다양한 변화를 나타냈다. 제주도 부근 서쪽 바다에서 상대적 에너지 밀도가 높은 것으로 나타났으며, 효율성 경제성을 보았을 때 파랑 에너지와 해상 풍력의 결합 단지로 적당한 곳으로 사료된다.
- 부경대학교 장미향 등은 동해 먼 바다에 파력 발전기를 설치하고 생산된 전력을 울릉도, 독도 지역에서 직접 사용하는 경우에는 파력발전 시스템 도입의 경제성을 확보할 수 있을 것으로 판단했다.

이 분석물은 미래창조과학부 과학기술진흥기금, 복권기금의 지원을 받아 작성하였습니다.