

조력에너지 기술 현황 및 경제성 분석

조영범* · 위정호*[†] · 김정인**

*가톨릭대학교 환경공학과, **중앙대학교 산업경제학과
(2010년 4월 10일 접수, 2010년 6월 15일 수정, 2010년 6월 22일 채택)

Status and Feasibility Study on Tidal Energy Technology

Young-Beom Cho*, Jung-Ho Wee*[†], Jeong-In Kim**

**Department of Environmental Engineering, The Catholic University of Korea*

***Department of Industrial Economics, Chung Ang University*

(Received 10 April 2010, Revised 15 June 2010, Accepted 22 June 2010)

요 약

현재 전 세계적으로 신재생에너지의 개발과 이용에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 조력에너지는 다른 재생에너지의 비해 안정적인 공급이 가능한 고급 자원이다. 본 논문에서는 조력에너지 대한 세계적인 연구 및 개발 동향을 고찰하였고 시화호 조력발전소와 울돌목 조류발전소의 경제성을 분석하였다. 댐 방식 조력발전은 경제성과 기술적 신뢰성이 있으나 상당한 환경적 논쟁이 있다. 반면, 조류식 조력발전은 완전한 상용화를 이루지 못하고 있으나 환경적 폐해가 거의 없는 것으로 평가되어 댐 방식 보다 더 많은 연구가 진행되고 있다. 시화호 조력발전인 경우 발전단가는 약 67.3원/kWh, 여기에 시화호의 조성비용을 추가로 고려할 경우 254원/kWh로 계산되었다. 반면 울돌목 조류발전의 발전단가는 약 400원/kWh로 이는 조류발전 기술이 성장 단계라 장비와 건설비용이 비싸고, 또한 아직 규모의 경제성이 적용되지 못한 결과라 하겠다.

주요어 : 재생에너지, 조력에너지, 조력발전, 조류발전, 시화호, 울돌목

Abstract — Currently, many nations in the world make a strong effort to exploit the new and renewable energy. Tidal energy is the constant and regular power sources with higher and more stable quality compared to other renewable sources. The present paper reports the status of tidal energy analyzing its latest technology and development. In addition, a feasibility study on two types of tidal power plant(TPP) systems is conducted based on many assumptions, conditions and data involved in the Korea environment. The Sihwa and Uldolmok TPP are considered as the reference of tidal barrage(TB) and tidal in stream energy conversion(TISEC) type, respectively. While TB technology is currently mature and reliable, there still remain many environmental issues. Whereas, TISEC is recently received more attention due to its environmental friendly aspect. Therefore, the TISEC is believed to be very promising technology as the TPP. The unit electricity generation cost of Sihwa TPP is approximately 67.3 KRW/kWh. However, considering additional cost of Sihwa lake construction, it increases to 254 KRW/kWh. In Uldolmok, the unit electricity generation cost is calculated to be about 400 KRW/kWh, which is even higher than that of Sihwa TPP. This is ascribed to high cost of TISEC device and construction cost due to its technological infancy as well as relatively small power capacity. Nevertheless, the TISEC technology would be substantially developed in the future due to its many advantageous features.

Key words : Renewable energy, Tidal energy, Tidal power plant, Sihwa, Uldolmok

[†]To whom corresponding should be addressed.
43-1, Yeokgok 2-dong, Wonmi-gu, Bucheon-si, Gyeonggi-do, Republic of Korea, 420-743
Tel : 02-2164-4866; E-mail : jhwee@catholic.ac.kr

1. 서 론

전 세계 에너지 수요의 대부분은 화석연료에 의해 공급되고 있으며 2007년 현재 그 양은 전체 에너지 소비량의 88%를 차지하고 있다 [1]. 그 결과, 온실가스가 증가하여 발생하는 급격한 기후변화 문제는 현재 인류의 생존을 위협하는 가장 큰 문제 중 하나이다. 따라서 신재생에너지에 대한 개발과 이용의 필요성은 더 이상 설명하지 않아도 매우 중요한 과제로 인식되고 있다. 특히 우리나라와 같은 화석연료 자원이 절대 부족한 환경에서 신재생에너지의 중요성은 더욱 부각되고 있다.

많은 종류의 신재생에너지 가운데 현재 태양광, 풍력에너지 및 에탄올 같은 일부 바이오 기술이 가장 상용화 되어있다. 그러나 이들을 포함한 대부분의 신재생에너지 자원의 가장 큰 단점은 에너지 강도의 변화가 크고 자원 획득이 간헐적이므로 안정적이고 규칙적인 에너지를 얻을 수 없다는 것이다. 하지만 조력에너지는 지구, 달, 태양 사이의 인력과 원심력으로 발생하는 조수 또는 이로 인한 조류에 의해 생성되는데 조수는 해양 표면에서 규칙적으로 상승하고 하락하면서 만조와 간조를 만들고 이들의 해수면 높이차인 조수범위 또는 조차(tidal range)를 만들어 내는데 이렇게 일정하게 생기는 조수범위의 변화는 태양광 및 풍력자원의 불확실성과는 비교할 수 없는 훨씬 예측가능하고 안정적인 고급의 에너지를 만들어 낼 수 있는 자원이다 [2-3]. 조력발전은 이와 같이 안정적인 조수차이로 생기는 해수의 위치에너지 또는 운동에너지를 전기에너지로 전환하는 기술이다 [4]. 따라서 현재 전 세계적으로 이에 대한, 개발 및 이용에 관한 관심이 증대되고 있다.

우리나라 서해안의 경우 전 세계적으로 가장 큰 조력에너지를 갖고 있는 장소 중의 하나로 알려져 있어 조력발전을 할 수 있는 무한한 잠재적 조건을 가지고 있다. 그럼에도 불구하고 여러 가지, 기술적, 경제적, 환경적 문제 때문에 조력에너지의 개발과 이용이 활성화되지 못하고 있었고 이러한 상황은 세계적으로도 비슷하였다. 그러나 최근 들어 신재생에너지의 중요성과 효율성이 인식되면서 우리나라의 경우 시화호나 울돌목의 조류발전과 같은 조력에너지의 개발과 이용에 관한 사업들이 상당히 활발하게 진행되고 있다. 이러한 중요성의 인식은 기후변화 대응에 대한 압박의 성격이 강하다. 우리나라의 경우 2012년부터 시작

되는 신재생에너지 의무할당제(Renewable portfolio standard; RPS)로 인해 대규모 발전사가 상대적으로 발전용량 확보가 쉽고 비교적 발전단가 저렴하다고 알려져 있는 조력발전사업을 진행하고 있는 것으로 알려져 있다.

일반적으로 현대식 조력발전은 두 가지 방식으로 분류된다. 1세대의 댐 방식(Tidal dam or barrage; 이하 “댐 방식”으로 언급)과 2세대인 조류방식(Tidal in stream energy conversion; TISEC, 이하 “조류식”으로 언급)이다 [5]. 두 방식의 근본적인 기술적 차이는 해수를 저장하기 위한 댐의 유무와 해수의 위치에너지를 또는 해수의 운동에너지를 전기에너지로 전환하는가에 의해 구별될 수 있다.

댐 방식은 댐을 만들어 조수차이로 해수를 일정 공간에 저장한 후, 저장된 해수의 위치에너지를 전기에너지로 전환하는 기술로 기존의 수력 발전과 매우 흡사한 기술이기 때문에 이미 기술적으로 완성되어 있고 많은 경험과 자료가 축적되어 있다. 따라서 경제성은 어느 정도 확보가 되어 있으나 환경에 관한 문제가 심각하게 남아있다. 금년 10월 완공예정인 시화호 조력발전소의 경우 댐 방식이긴 하나 조차에 의한 위치에너지를 이용하기 보다는 조차에 따른 조류를 이용하는 in-situ 발전이기 때문에 변형된 댐 발전 방식이라 볼 수 있다.

조류식 조력발전의 경우 해수의 저장(또는 댐)없이 조차에 의해 발생하는 강한 해수 내 조류의 운동에너지를 바로 전기에너지로 변환하는 방식으로 우리나라의 울돌목 조류발전소의 발전 형태가 본 발전 방식이다. 댐 방식에 비해 환경적인 측면에서 상당히 유리하여 현재 댐 방식 보다 훨씬 더 많은 연구가 진행되고 있고 전 세계적으로 많은 프로젝트들이 수행 중이거나 계획 중이다. 하지만 기술 자체가 초기 단계로 현재 개발하고 연구할 부분들이 매우 많다. 일반적으로 이 기술은 물리적으로 비슷한 풍력 발전 기술보다 약 15년 뒤져있다 [6]. 그러나 산업계에서는 본 기술도 최근 풍력에너지가 이룬 성공과 비슷한 성과를 얻어내기를 기대하고 있다. 울돌목 조류발전이 성공적인 운전이 검증된다면 특히 우리나라의 조류식 발전의 잠재력은 대단히 클 것으로 예상된다.

이와 같이 조류식 발전 기술에 관해서는 연구 및 개발되어야 할 부분이 많고 댐 방식에 관해서는 좀 더 명확한 경제성 및 환경 영향 등에 관한 많은 연구가 이루어져야 한다. 이를 위해 현재 조력에너지의 세

계적인 기술 수준과 현황을 이해하고 분석하는 연구가 대단히 중요하며 또한 경제성에 대한 평가 역시, 매우 중요한 요소이다. 조류식 발전인 경우 아직 상업적으로 성공한 예가 없는데 이는 조류발전이 가능한 지역이 매우 제한적이며 경제성이 보장되지 않고 또한 몇 가지 기술적인 문제가 남아 있기 때문이다. 따라서 본 논문에서는 조력발전, 특히 조류발전 기술에 대한 세계적인 연구 및 개발 동향을 고찰하였고 경제성 분석에 필요한 많은 정보를 분석하여 이를 바탕으로 조력에너지 자원이 풍부한 우리나라 조건에서, 발표된 공식 자료와 여러 가지 가정과 조건하에서 시화호 조력발전소와 울돌목 조류발전소를 사례로 조력발전의 경제성에 대해 분석함으로써 국내 조력발전의 개발과 이용에 도움이 되고자 하였다.

2. 조력에너지

2-1. 조력에너지의 역사

조력에너지 이용의 역사는 중세시대로 거슬러 올라간다. 10세기경, 페르시아만 연안에서 제분용 기기의 동력으로 이용되었고 11세기 영국에서는 조수용 풍차가 운행되었다. 그 후 18세기 들어 서유럽과 캐나다, 미국 등에서 많은 수의 조수용 풍차가 만들어졌다. 그러나 산업혁명 직후 다량의 전기에너지 생산과 사용이 급증하면서 조수용 풍차는 퇴보하며 사라져갔다. 그 후 1935년 미국 육군 공병대에서 Cobscook만에 65 MW의 조력발전소를 건설하는 프로젝트를 진행했으나 2년 후 자금부족으로 중단되었다. 그 후 1950, 60년대를 거치면서 프랑스의 La Rance 조력발전소가 건설되었고, 70, 80년대에는 미국과 캐나다 정부가 Fundy만의 조력발전 가능성을 검토하고 대규모 조사를 지원하여 Annapolis 조력발전소를 건립, 운영하였다 [5]. 그 후 1990년대 후반, 부각되는 기후변화 대응에 따라 지형 및 물리적으로 조력발전이 가능한 영국, 노

르웨이, 아일랜드, 이탈리아, 스웨덴, 캐나다 그리고 미국 및 우리나라를 중심으로 조력에너지 발전 연구가 활성화되기 시작하였고 현재 많은 나라들이 조력에너지 발전에 힘을 기울이고 있다.

2-2. 조력에너지의 생성 원리

2-2-1. 조수 사이클

조수는 바다에 대해 달과 태양의 중력에 의해 발생하나 달이 지구에 더 가깝기 때문에 달의 인력은 태양의 인력보다 2.2배 더 크며 따라서 달이 조수에 미치는 영향이 더 크다. 봄과 가을의 분점을 제외하고, 지구회전축은 태양의 겉보기 궤도면과 수직을 이루고 있지 않기 때문에 태양의 인력이 작용하는 범위의 각도는 계속적으로 변화한다. 마찬가지로 달의 인력도 달의 공전주기 동안 계속해서 변화한다. 이러한 이들의 다른 위치의 조합 또는 이들의 상대적인 위치 변화는 주기적으로 조수를 높아지거나 낮아지도록 만든다. 이러한 주기성은 기본적으로 세 개의 사이클에 기인하는데 이 주기들의 발생원인과 특성 등을 Table 1에 표시하였다.

매일 두 번의 밀물과 두 번의 썰물이 있는데 이는 반일주기 때문이다. 즉, Fig. 1에서와 같이 [7] 달과 마주하고 있는(또는 달과 가장 가까운) 지구의 표면에서는 달의 인력에 의해, 그리고 그 반대쪽 지구 표면에서는 지구의 원심력에 의해 바다 수위의 상승부(bulge)가 만들어 진다. 이 경우 만조가 된다. 반대로 달과 90°로 위치한 지구의 옆면에서는 가장 낮은 수위를 보이는 소조가 나타난다. 그러므로 지구의 자전 기간동안, 즉 하루 두 번의 대조와 두 번의 소조가 나타난다 [8].

또한 14일 주기 때문에 한 달 두 번의 사리와 두 번의 조금 현상이 발생한다. 달과 태양의 중력장이 겹쳐지는 즉, 초승달과 보름달일 때, 태양의 중력장은 달의 중력장을 배가시켜 그 결과 조수차가 가장 큰

Table 1. Three cycles causing the tidal energy.

주기	반일주기	14일 주기	29.54일 주기
발생원인	달의 중력장 내, 지구의 자전	달과 태양 중력장의 상호 작용	달의 지구 주위 공전
주기	12시간 25분 14초	14일	29.54일
현상	지구의 자전기간동안 두 번의 대조와 두 번의 소조 발생	한 사리(보름과 초승)와 조금(음력7, 8일과 22, 23일) 발생	조수의 미세한 강화 및 약화
기타	달의 공전으로 인해 매일 약 50분 늦게 발생한다.	-	-

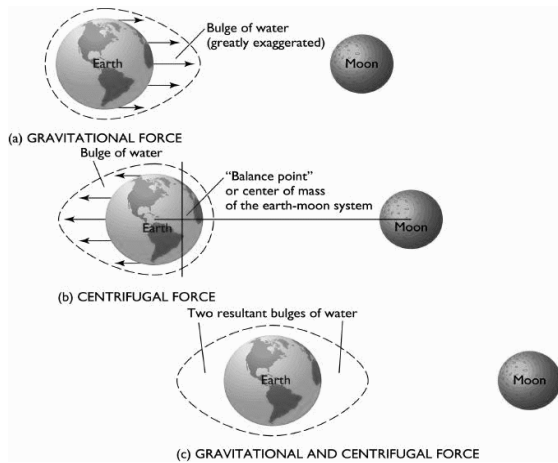


Fig. 1. The effect of the moon on tidal range [7].

대조(한사리)가 나타난다. 반면 달이 1/4쯤 차는 상현과 하현, 즉 음력 7, 8일과 22, 23일 태양의 중력은 달의 중력을 부분적으로 상쇄시키고 그로 인해 조수차가 가장 작은 소조(조금)가 나타난다. 마지막으로 29.54일 주기로 이는 달이 지구 주위를 타원형의 궤도로 29.54일 동안 공전함으로써 위치 이동에 따라 미세하게 조수에 영향을 미치게 된다 [9]. 따라서 세 가지 주기가 매일 달라 조수 패턴이 조금이라도 다르고 이는 18.6년 주기로 반복된다. 이와 같은 조수의 변화가 밀물과 썰물 방향의 흐름을 만들어 낸다. 밀물과 썰물의 속도는 0에서 최대까지 다양하며 속도가 0일 때는 썰물과 밀물이 바뀌는 정조시간에 발생하며 최대 속도는 정조시간과 정조시간 중간에 발생한다 [9].

2-2-2. 이용 가능 자원 및 한계

이와 같은 조수의 변화는, 다량의 에너지를 지구에 제공한다. 그러나 이 에너지 중 일부는 소실되는데, 파도에 의해 또한, 바닷물과 해안의 얇은 곳 밀바닥과 수면 사이에서 마찰로 인해 소실된다. 역사적으로 조력에너지의 가장 큰 감소는 해안의 얇은 바다, 즉 천해 바닥과 해수의 마찰에 때문이라고 생각되어져 왔다. 그러나 공해에서도 해저 지형에 의해 조수에너지가 분산되어 수중의 파도 형태로 손실된다는 증거 또한 오랫동안 주장되어 왔다. 하지만 이러한 추정값은 측정하는 방법에 따라 매우 달라 정확하게 결론 내리기 어렵다. Ray와 Egbert [10]는 약 6년에 걸쳐 인공위성으로 얻은 자료를 연구하면서 조력에너지에 관한 논문을 발표했는데 2000년 6월 네이처에 발표된 그들의 논문 따르면 조력에너지의 총 손실 중 25-30%

정도인 약 1조 W가 심해에서 사라지고 나머지는 천해에서 사라진다. 그러므로 천해에서 사라지는 대략 70-75%에 이르는 3조 W가 전 지구가 조수를 통해 얻을 수 있는 이론적인 최대 조력에너지 값이라 볼 수 있다. 이와 같은 이론적 조수에너지 중에 실제로 이용 가능한 조수 자원의 총량은 여러 가지로부터 계산되어졌지만 가장 기본적인 요소는 해수 깊이에 따른 평균 전력밀도와 해협의 평균 횡단면적을 곱하여 얻어지는 총 연 평균 조수 에너지이다. 이 값을 최대로 얻기 위해서는 조수 흐름과 조차가 최대인 장소를 선택해야 하는데 가장 큰 조수는 해안을 따라 나타나며, 해안선 지형에 영향을 받는다. 전 세계를 통틀어 조수범위가 매우 큰 경우는 대부분이 삼각형으로 되어 있어 물이 모아지는 효과(funnelling effect)가 있는 만이나 강구지역이며 이러한 장소에서는 또한 연속방정식에 의해 강한 조류가 발생한다. 또한 만의 길이가 조수 파(tidal wave) 길이의 두 배가 되는 지역에서는 수력 공명(hydraulic resonance) 현상이 나타나게 되며 이런 현상은 조수의 진폭을 배가시켜 조수에 의해 보다 높은 파도가 일어나게 한다. 이런 곳의 대표적인 장소가 바로 세계에서 조수범위가 가장 큰 곳인 캐나다의 Fundy 만이며 우리나라의 서해연안도 이러한 장소이다.

이러한 장소에 잠재하는 이론적 총 조수에너지 중에 실제 추출하여 이용 가능한 에너지양은 그 한계를 정하고 있다. 이러한 한계를 정한 가장 큰 이유는 환경적인 영향을 최소화하기 위한 것으로 한 해 평균 추출 가능한 전력의 양은 총 이론적 에너지양의 15%로 제한하는 것이 좋다고 알려져 있다. Bryden과 Melville에 [11] 따르면 15%를 추출하면 조수에 의한 조류속도가 평균 4%정도 감소되며 이 정도 수준의 변화는 수역의 순환과정에 중대한 변화가 초래되지 않는다고 주장하고 있다 [5, 11]. 다시 말해서 4% 조류속도의 감소가 해수 내 영양소 혹은 산소를 느리게 운반하고, 난류 및 해수 혼합의 감소와 같은 중대한 환경적 영향을 초래하는지에 대해 명확한 정량적 정성적 분석이 아직 보고되고 있지는 않지만 이 정도의 유속 감소는 해수 내 부분적인 복원력이 제공됨으로써 어느 정도 회복된다고 주장하고 있다. 하지만 이런 한계값이 모든 조력발전 가능 지역에 적용되는 것은 아니며 추출비율은 특정한 해협의 기하학적 모양과 조류양식에 따라 결정될 수 있다. 그럼에도 불구하고 조류의 흐름은 대기의 흐름과는 달리 해저와 해수 표면 사이의 유한한 공간속을 흐르며 그 깊이는 보통 100 m

이하이다. 그러므로 조력에너지는 공간적으로 제한되어 있어, 과도한 양의 에너지 추출은 그 지점의 자연 순환과정을 감소시켜 환경적 문제를 야기 시킬 수 있다.

2-3. 조력발전 방식

앞서 언급 했듯이 조력발전에는 댐 방식과 조류식 발전 등 두 가지 형태가 있으며 이에 대해 다음 절에 자세히 언급하였다.

2-3-1. 댐 방식

댐 방식 조력발전은 썰물 때 밀려오는 해수를 담수 호에 저장한 후 밀물 때 생기는 낙차에 의해 전력을 생산해 내는 방식으로 조차가 5 m 이상인 만이나 하구 사이에 건설되는 일반적인 댐 형태의 발전 형태이다 [6]. 본 방식의 오랜 역사를 가지고 있어 기술이 충분히 발달되어 있고 상당한 신뢰성을 가지고 있다. 대표 발전소는 프랑스의 La Rance 조력발전소이며 이를 포함하여 현재 전 세계적으로 4개의 발전소가 상업적으로 가동되고 있으며 그들의 특징을 Table 2에 표시하였다 [9, 12-17].

Rance 발전소는 양방향 발전 방식이며 여분의 전력은 보조 저수만에 해수를 pumping 하여 해수의 위치에너지로 에너지를 저장하는 방식을 채택하고 있다. 러시아의 Kislaya 발전소의 경우 1968년 공사가 시작되었지만 경제적인 이유로 10여 년간 공사가 중단되어 2004년 준공되었고 0.4 MW이었던 용량이 2006년 추가 되어 1.2 MW급으로 확장되었다 [15].

이외 현재 영국의 Offshore Tidal Lagoons, 호주의 Tidal Delay, 멕시코의 Two-Basin Barrage 등이 시범가동 중이다. 또한 세계적으로 댐 방식 조력발전이 가능한 많은 잠재적인 지역이 있다. 영국의 Severn만, Wash만, 캐나다의 Fundy만, 러시아의 Mezeh만과 Tugar

만, 아르헨티나의 Puerto Rio Gallegos만 등에서 타당성 연구가 수행중이다. 또한 인도의 Kachchh만, 호주의 Secure만, 브라질의 Sao Luis 등의 지역에서도 소규모의 발전시설에 관한 타당성 조사가 수행되고 있고 [6] 우리나라인 경우 가로림만, 인천만, 석모도에 건설 예정인 발전소도 댐 방식이다.

2-3-2. 조류식

조류식 발전방식은 조차를 직접적으로 이용하는 기술이 아닌 댐 방식과는 근본적으로 다른 발전 방식이다. 즉 해류 내부의 조수차이에 의해 생성되는 조류의 운동에너지를 in-situ로 전기에너지로 전환하는 기술이다. 이 기술은 상업적 성장의 가능성을 보이며 지난 10년간 영국, 아일랜드, 이탈리아, 노르웨이, 스웨덴, 미국 등지에서 높은 관심을 끌어 모았다. 기본적으로 이 방식은 여전히 논란이 되고 있는 조력발전의 환경에 대한 위해성 측면에서 댐 방식 보다는 훨씬 친환경적으로 알려져 있어 더욱 주목받고 있다. 조류식 기술은 2003년 현재 조류발전 설비 분야 제1위 기업인 Marine Current Turbines Ltd.(MCT)사의 300 kW 터빈 장비를 가지고 영국에서 최초로 그 가능성에 대해 3년간 성공적인 실험이 수행되었다. 이 기간 동안 많은 기술적 정보와 자료가 수집되었고 2006년 MCT, Verdant Power사(미국), Clean Current 사(캐나다)가 조류형 방식의 시제품 장비 시연 등을 수행하였다. 그 결과 본 방식의 발전소가 적합한 장소에 설치된다면 현재 상업적인 지상 풍력기술, 천연가스, 초임계석탄 기술과 같은 범위의 생산단가로 전기를 만들어 낼 수 있다는 경제성도 확인 되었다.

기술적 측면에서, 본 방식 장비의 핵심인 터빈의 평균 회전 속도는 로터의 직경에 따라 다르지만 보통 저속 범위인 10 rpm 내외이며 블레이드 끝부분의 선

Table 2. Tidal barrage power plants currently operated in the world and their features.

	위치/관리기관	건설기간	저수만 면적 (km ²)	조차(m) 평균/최대	용량(MW) 최대/실제	연발전량 (GWh/년)	발전방식	터빈	참고 문헌
La Rance	프랑스 Rance 강/ Electricite de France	1961-67	22	8.4/13.5	349/240	480	복류 및 pumped storage	10MW bulb 터빈 24개	[9, 12]
Annapolis tidal	캐나다 Fundy만/ Nova Scotia Power	1980-84	83	6.4/16.2	765/20	30	단류	Straflo(rim) turbine	[13-14]
Kislaya	러시아 Kislaya Guba/-	1968-2004	2	5/13.4	2/0.4(1.2)	-	복류	Bulb 빈2개 1 × 0.2 MW 1 × 1.5 MW	[15]
Jiangxia	중국 Zhejiang/-	1972-80	2	7.1/8.4	-/3.2	5.2~6.5	복류	터빈6개	[16-17]

속도는 약 10-12 m/s 정도이다. 이 정도의 회전 속도로 공동현상(cavitation)이 만들어지지 않도록 스스로 제어하며 안정적으로 가동된다. 미국의 경우 현재 수행되고 있는 시연 프로젝트가 성공적으로 이루어질 경우, 최고 50 MW의 전력을 생산하는 중규모의 조류 발전소가 향후 5년 이내에 건설될 것으로 예측되고 있다. 물론 이러한 예측은 정부 지원과 본 산업에 주어지는 다양한 인센티브에 크게 의존하고 있지만, 일반적으로 산업계에서는 조력에너지 산업이 상당한 성과를 얻어내기를 기대하고 있다 [5].

3. 조력에너지 개발 및 이용의 세계적 현황

지난 10년간 영국, 노르웨이, 아일랜드, 이탈리아, 스웨덴, 캐나다 그리고 미국 내의 대학과 정부 및 산업계에서 진행된 조력발전 연구 및 프로젝트는 최근 부상하는 조류식 조력발전에 중요한 기초를 확립했다. 이러한 업적을 바탕으로 이에 관한 연구가 세계적으로 활발히 수행되고 있다. 미국의 경우, 미국 해양청(National Ocean Service) 내 해양 생산 및 서비스 이용 센터(Center for Operational Oceanographic Products and Services)에서는 해수의 높기와 해류의 관찰 및 예보 자료를 수집하고 배포하는 역할을 하고 있으며 미국 전기전력연구소(Electric Power Research Institute; EPRI)에서는 조력에너지에 대한 기술적 경제적 분석과 연구 지원 등을 하고 있으며 미국 연방 에너지 규제 위원회(Federal Energy Regulatory Commission; FERC)에서 규제와 인허가에 관해 관여하고 있다. 유럽은 각 나라의 전문기관 이외 유럽 해양에너지 센터(European Marine Energy Centre; EMEC)에 의해 많은 프로젝트가 관찰되고 있다.

3-1. 전 세계 조수 분포

전 세계 일일 평균 조수범위의 분포도를 Fig. 2에 표시하였다 [5]. 기본적으로 붉은 색으로 표시된 지역에서 경제적인 조력발전이 가능하다. 실제로 조류식 조력발전의 시연 및 설치가 진행되고 있는 곳은 북미의 경우 서북부 캐나다와 미국 동부 연안을 포함하는 Fundy만, 유럽의 경우, 영국, 아일랜드, 및 노르웨이, 우리나라의 서, 남해안 및 호주의 북부 연안 정도이며 이곳들을 중심으로 진행되고 있는 프로젝트를 다음 절에 정리하였다.

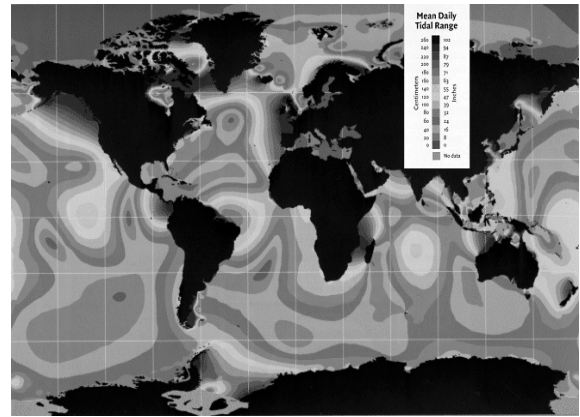


Fig. 2. Global distribution of mean tidal range [5].



Fig. 3. Rotor and blade of SeaGen turbine with the capacity of 1.2 MW [38].

3-2. 조류식 발전의 개발 현황

조류식 조력발전에 가장 핵심은 터빈 기술이다. 언급했듯이 조류형 발전 기술은 아직 초기 단계 이므로 터빈 기술 역시 개발단계이다 [18]. 그러나 많은 노력으로 인해 최근 축소 모델과 실제 모델의 시제품 일부가 상용화되고 있다 [19-20]. 이러한 터빈의 성능 및 관련 평가는 공식적으로 EMEC에 의해 수행되고 있다. EMEC이 2005년부터 수행한 평가 자료를 근거로 Table 3에 현재 및 과거에 수행되었던 평가 사업 또는 상용화가 임박한 터빈과 관련 프로젝트 들을 표시하였다 [21-37].

터빈용량은 작게는 5 kW에서 크게는 3 MW로 다양하며 수평축 형태가 대부분이다. 하지만 조류 지역의 특성에 따라 수직축이나 또는 북류식 발전을 위해 덕트형도 많이 쓰이고 있다. 현재 세계에서 가장 대규모로 알려진 1.2 MW 급 SeaGen 터빈 로터와 블레이드를 Fig. 3에 표시하였고 [38] 국내 울돌목 조류 발전소에 설치된 나선형의 500 kW급 터빈을 Fig. 4에 표시하였다 [25].

Table 3. Characteristics of TISEC device and related projects.

장비	제조회사/국가	용량(MW) 및 형태	크기 및 구성	개발단계	특징	참고 문헌
Deltastream Turbine	Tidal Energy Ltd. /영국	1.2/수평축	삼각 지지대 위 3개의 rotor 각 rotor마다 직경 15 m 인 3개의 blade	테스트	구조적인 안정성을 위하여 무게중심이 낮음	[21]
Evopod Tidal Turbine	Ocean Flow Energy /영국	0.022/수평축	5개의 blade	Strangford만에서 1/10 scale이 성공적으로 테스트	구조물이 해저에 계류되어 물에 떠있음	[22]
Free Flow Turbines	Verdant Power Ltd. /미국-캐나다	수평축	직경 4.68 m 인 3개의 blade	New York East river에서 테스트 중	2008년 하반기에 SustainableDevelopment Technology(Canada)로부터 Cornwall Ontario River Energy project를 위한 계약 체결	[23-24]
Gorlov Helical Turbine	GCK Technology Inc. /미국	수직축	시제품; 직경 1 m 인 3개의 나선형 blade	국내 울돌목 조류 발전소에서 사용 중		[25]
Lunar Energy Tidal Turbine	Lunar Energy Ltd. /영국	1/덕트형	직경 11.5 m, duct 길이 19.2 m 인 복류식	개발중	국내 해안에 300개의 조력터빈 설치 계약	[26]
Neptune Tidal Stream Device	Aquamarine Power Ltd. /영국	2.4/수평축	하나의 지지대위 2개의 rotor rotor 당 3개의 blade		복류식 조만간 EMEC에서 장치 테스트 예정	[27]
Nereus Tidal Turbine AN series	Atlantis Resource Corporation Ltd. /싱가폴	0.4/수평축		2008년 7월 성공적인 테스트	얕은 수심에서 사용 호주 전력망에 연결	[28]
Solon Tidal Turbine AS series		0.1, 0.5, 1/수평축 덕트형		2008년 8월 성공적인 테스트	깊은 수심에서 사용	
AK series		1, 2/수평축	복류식; 1 MW인 경우 각 방향으로 각각 3개의 blade	하나의 축에 반대 방향으로 같은 blade	2010년 여름 설치 예정	
Open Centre Turbine	Open-Hydro Ltd. /아일랜드	0.25/덕트형	직경 6 m 의 rotor	2006년 스코틀랜드에서 테스트	최근 영국 국가 전력망과 연결 2008년 10월, Electricity suppliers in France (EDF)의 시범 전력생산 농장에 채택	[29]
Pulse Tidal Hydrofoil	Pulse Generation Ltd. /영국	0.1		2008년 10월 Humber강에 설치		[30]
Seaflow	Marine Current Turbines Ltd. /영국	0.3		2003년 5월 Devon해안에 설치	SeaGen의 소형모델	[31]
SeaGen		1.2/수평축	Rotor에 직경 16 m 인 2쌍의 blade	2008년 5월 Strangford 만에 시범 모델이 설치 되어 전력망에 연결, 성공적으로 작동 중	복류식 작동을 위한 속도조절 가능	[31]
Stingray Tidal Energy Converter	Engineering Business Ltd. /영국	0.15 (시제품)	고정형 hydroplane을 평행하게 연결	2002년 9월 영국 Yell Sound에 성공적으로 설치되었다 제거	현재 개발이 지연된 상태	[32]
Tidal Fence Davis Hydro Turbine	Blue Energy Ltd. /캐나다	0.125/수직축	Rotor와 연결된 고정된 4개의 수중익선 blade	아직 테스트 되지 않음	어떠한 지역에서도 조력에너지 추출 가능	[33]
TidEl Stream Generator	SMD Hydrovision Ltd. /영국	0.5	직경 15 m 인 blade	1/10규모 모델이 EMEC tidal에서 성공적으로 테스트	해저에 고정된 chain에 의해 물에 떠 있음	[34]
Tidal Stream Turbine	Hammerfest Strom AS /노르웨이	0.30	3개의 blade	2003년 9월 노르웨이 Kvalsundet에 설치	2003년 11월 세계 최초로 전력망에 연결	[35]
The Clean Current tidal turbine generator	Clean Current Inc. /캐나다	수평축 덕트형	복류식 Shaft와 gearbox가 없음	2009년 상업적 규모로 Fundy만에 설치	다양한 속도에서 운전가능	[36]
EnCurrent Turbine	New Energy Corporation Inc. /캐나다	0.005, 0.01, 0.025	5개의 blade	캐나다의 여러 지역에서 운전 중	125, 250 kW급 터빈이 올해 개발 예정	[37]



Fig. 4. Gorlov Helical Turbine equipped in Uldolmok (The rights to the turbine are held by GCK Technologies) [25].

조류식 조력발전은 풍력 기술과 유사하나 운전 상태에서의 몇 가지 차이점이 있다. 조류식 터빈은 일반적 상태 하에서 공기보다 밀도가 832배 더 큰 물속에서 작동되기 때문에 매우 큰 힘과 운동량에 노출된다 [39-40]. 일반적으로 터빈의 효율이 가장 중요한 변수가 되는데 로터로 가동되는 대부분의 터빈의 경우에는 풍력발전과 마찬가지로 항상 Betz 한계 효율에 제한을 받게 되기 때문에 최대 터빈 효율은 이론적으로 59.3%이하가 된다. 하지만 풍력 발전의 자체 효율은 일반적으로 드라이브 트레인에서 96%, 발전기에서 95%, 전력변환기에서 98%로 총 터빈의 기계적 손실은 10% 이내이다. 하지만 비 로터 형태의 터빈은 Betz 한계 효율에서 자유로우며 최근 발표되는 터빈의 효율은 80%라고도 주장되는데 터빈에 효율은 제조업체들의 기밀 사항으로 정확한 추정이 쉽지 않다. 효율 이외에 터빈의 개발에 관련된 문제로는 설치과제, 유지, 전기전송, 부하상태와 환경적인 영향 등이 고려되고 있다.

4. 국내 조력발전 현황

1930년대, 조선총독부에 의해 최초로 강화도 남부에 조력발전의 실현가능성에 관한 광범위한 연구가 시도되었다. 조류식 발전이 처음 시도된 때는 1963년으로 울돌목에 시설이 설치있는데 여러 가지 문제로 중단되었다는 기록만 남아있다. 1970년대 들어 댐 방식과 조류식 개발 가능성을 검토했지만 경제성이 매우 낮게 분석되어 중단되었다. 1978년에 한국해양연구원과 한국전력공사가 지역에 따른 조력발전 개발의 잠재성 평가가 수행되었다. 또한 1986년 해양연구소

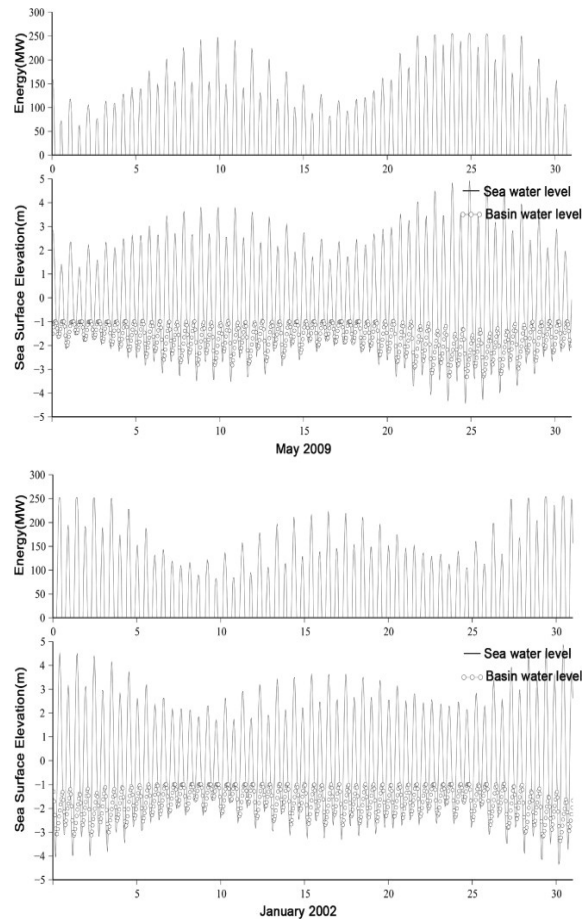


Fig. 5. Computed energy(up) and water level(down) at sea side(dashed line) and basin side(dotted) [41].

는 한국전력공사로부터 위탁을 받아 울돌목 주변해역의 조류발전 가능성을 조사한 적이 있었으나 이때도 경제성 등의 이유로 구체적인 개발 연구는 착수되지 않았다. 그 이후 1988년 8부터 “대체에너지 개발 및 이용·보급 촉진법”에 따라 조력을 포함한 해양에너지 개발을 위해 체계적인 기본 계획이 수립되었다. 그 결과 1993년도 가로림만이 조력 개발지역으로서 지정되었고, 1994년에 시화호가 지역의 농업과 관계수를 안정적으로 공급하고 대도시 근처의 산업/농업 지역을 개발하기 위한 제방 건설로 형성되었다 [41]. 2000년대 들어, 화석연료 고갈과 지구온난화 등의 환경문제가 대두되면서 조력에너지 이용에 관한 연구와 투자가 활발히 진행되었고 그 결과 현재 가시적인 성과가 나타나기 시작하였다. 2004년 12월 시화호 조력발전소가 착공되어 금년 10월 완공을 앞두고 있으며 2005년 4월 착공되어 2009년 9월 울돌목 조류발전소가 준공되어 시연되고 있다.

조력발전이 가능한 최적의 장소는 기본적으로 조차가 크고 많은 양의 해수가 빠르게 이동하며 수심측량이 쉽고 장비 설치가 용이한 해저의 특성을 갖고 있는 지형학적 특성을 가지고 있어야 한다. 또한 바다를 다른 목적으로 사용하는 경우가 최소이며 그로 인한 갈등이 없고, 전력망과 연결성이 좋은 장소이어야만 한다. 이러한 관점에서 우리나라는 조력발전에 무한한 잠재력을 가지고 있다. 현재 국립해양조사원에 [42] 의해 해양에너지 자원평가와 관련된 자료가 제공되고 있는데 서해안과 남해안에는 조류(100만 kW), 조력(650만 kW) 및 파력(650만 kW) 등 총 1400만 kW의 해양에너지가 부존된 것으로 추정되고 있으며 대규모 발전이 가능한 것으로 평가받고 있다. 시화호의 경우 특정한 날에 대한 조차분포와 이것으로부터 얻을 수 있는 에너지 용량을 Fig. 5에 표시하였는데 [41] 평균조차 5.6 m(최대조차 7.8 m)이고 최대 250 MW의 발전 용량을 가지고 있다.

5. 조력발전의 경제성 분석

전통적인 댐 방식 조력발전에 대해서는 몇 가지 상용화 사례가 있고 수력발전의 자료를 참고 할 수 있

어 이에 대해 경제성에 관한 몇 가지 자료가 제공되고 있다. 국내에서 발표된 자료에 따르면 발전단가의 경우 90.5원/kWh [43]와 107원/kWh [44]로 추정되고 있으나 계산 근거는 알 수 없다. 반면 조류식 발전의 경우는 여러 나라에서 많은 관심을 갖고 있으나 아직 본격적인 상업화 단계가 아닌 시범 또는 파이럿 단계이므로 경제성에 대해 구체적으로 알려지지 않고 있다.

본 절에서는 댐 방식의 예로는 시화호를 조류식 발전의 예로 울돌목 발전소를 사례로 발표된 자료를 바탕으로 경제성 분석을 수행하였다.

5-1. 가정과 조건

시화호와 울돌목 발전소의 특성과 여러 가지 경제성 분석에 필요한 가정과 조건 등을 Table 4에 표시하였다.

시화호의 경우 case 1은 시화담수호 조성에 필요한 비용을 배제하고 검토된 경제성 분석이며 case 2는 담수호의 조성비용을 포함한 경우로 case 2에 대해서는 끝부분에 설명하였다. 발전용량과 연간발전량, 그리고 총 건설비용은 한국수자원공사 [45]와 한국동서발전 [46]에서 공식적으로 밝힌 자료를 참조하였다.

Table 4. Various assumptions, conditions and data required for the feasibility study on Sihwa and Uldolmok tidal power plant.

조력발전소		시화호(Case 1)	시화호(Case 2)	울돌목
소유자		한국수자원공사	-	동서발전
발전용량(MW)		254	254	1
연간발전량(GWh)		552.7	552.7	2,4
총 건설비용(억원)		3,551	13,197	125
금융이자(억원)		159.8	159.8	5.6
총 건설비용, 금융비용포함(억원)		3,710.8	13,790.9	130.6
MW당 건설비용, 금융비용포함(억원/MW)		14.6	54.3	130.6
건설비용 상환기간(년)		15	15	15
연간 상환액(억원/년)		247.4	919.4	8.7
MW당 연 O&M 비용(억원/MW/년)		0.88	1.9	0.88
연 O&M 비용(억원/년)		223.5	482.6	0.88
연료비		0	0	0
CDM 방법론	ACM0002			
	Operating margin(tCO ₂ /MWh)		0.7448	
	Build margin(tCO ₂ /MWh)		0.3735	
	Baseline emission factor(tCO ₂ /MWh)		0.5592	
	Project activity emission(tCO ₂ /MWh)		0	
탄소배출권 가격; Price of CERs(유로/tCO ₂ ; 2008년 기준)			20	
원/유로 환율(2008년 기준)			1,600	
원/USD 환율(2008년 기준)			1,100	

시화호의 건설비용 조달을 위해 연평균이자율 4.5%에 15년 균등 상환 조건으로 자금을 차입한다고 가정하면 금융비용을 포함한 총 건설비용은 3,711억원으로 연간 247억원의 비용이 건설비용으로 상환되며 울돌목인 경우 건설비용은 구조물에 90억원, 기전설비에 35억원이 소요되어 총 125억원으로 발표되었는데, 시화호와 같은 금융 차입 조건을 적용하면 금융비용을 포함하면 총 건설비용은 131억이며 이를 15년 동안 균등 상환한다면 8.7억원이 연간 건설비용 명목으로 상환된다.

운전 유지 보수(Operation and Maintenance; O&M) 비용에 대해서는 실제 조력발전소를 운영한 경험이 부족하기 때문에 상당히 불확실한 부분이라 할 수 있다. 그러나 근해의 석유, 가스, 풍력 산업들의 O&M 비용을 참고할 수 있다. 그러나 조력 터빈은 해수 속에서 작동하므로 수면 위에서 작동하는 이들에 비해 더 복잡하고 유지 보수에 더 많은 비용이 소요된다. 이러한 내용을 근거로 연간 O&M 비용은 Denny 등이 [47] 제시한 값을 사용하여 시화호와 울돌목인 경우 각각 매년 223억원 및 0.9 억의 O&M 비용이 소요된다고 가정하였다. 두 경우 모두 연료비는 없다.

조력발전으로부터는 탄소배출권을 얻을 수 있으며 시화호인 경우 2006년도에 이미 CDM 사업으로 승인을 받은 상태이고 울돌목은 현재 CDM 사업 등록 예정이다. 획득 가능한 탄소배출권 산정을 위해 필요한 CDM 방법론은 ACM0002를 적용하였다. Baseline emission factor를 구하기 위해 operating margin(OM)

은 2004년~2006년의 한국전력의 [48] 자료를 사용하였고 build margin(BM)은 2006년도 값을 사용하였으며 combined margin은 $0.5 \times OM + 0.5 \times BM$ 을 사용하였고 사업 기간 중 CO₂의 발생은 없다고 가정하였다. 이와 함께 조력발전소의 수입은 전기 매출에 의해 발생하는데 2004년 해양에너지의 발전차액지원제도(Feed-in-tariff)의 기준가격은 용량이 50 MW 이상으로 kWh당 시화호의 경우 62.81원, 울돌목의 경우 90.50원의 보조금이 15년 동안 적용될 수 있으나 울돌목의 경우 용량이 50 MW 이하이고 또한 2012년부터는 RPS가 적용되기 때문에 발전 차액 지급액은 무시하고 대신 손익분기점이 될 수 있는 최소의 판매단가를 계산하였다.

5-2. 경제성 분석 결과

앞서 언급한 가정과 조건하에서 수행된 두 발전소의 경제성 결과를 Table 5에 표시하였다.

우선 연간 소요되는 총 비용은 금융비용을 포함하는 건설비용에 O&M 비용과 연료비를 합한 금액으로 시화호와 울돌목에 대해 연간 약 471억원 및 9.6억원이 각각 소모된다. 반면 연 수입은 탄소배출권에 의한 수입에 전력 판매 매출의 합이다. 따라서 손익분기점이 이상이 되기기 위한 전력 판매 수입은 각각 연간 약 372억원 및 9.2억이 되며 이를 총 전력 생산량으로 나누면 전력 판매단가는 시화호인 경우 약 67.3원/kWh, 울돌목인 경우 381.6원/kWh로 계산되어 손익분기점 이상이 되려면 판매 단가는 이 값 이상이 되어야한다. 시화호의 경우 판매단가는 흥미롭게도 우리

Table 5. Results of the feasibility study on Sihwa and Uldolmok tidal power plant.

조력발전소	시화호(Case 1)	시화호(Case 2)	울돌목
총 비용(억원/년)	470.9	1,402.0	9.6
건설비용(금융비용포함)(억원/년)	247.4	919.4	8.7
O&M 비용(억원/년)	223.5	482.6	0.88
연료비용(억원/년)	0	0	0
총 수입(억원/년)	470.9	1,402.0	9.6
전력판매(억원/년)	372.0	1,303.1	9.16
탄소배출권; CER credit(억원/년)	98.9	98.9	0.43
CO ₂ baseline emission(tCO ₂ /년)	309,042.2	309,042.2	1,342.0
CO ₂ system emission(tCO ₂ /년)	0	0	0
CO ₂ emission reduction(tCO ₂ /년)	309,042.2	309,042.2	1,342.0
수지(억원/년)	0	0	0
발전단가(원/kWh)	85.2	253.7	399.5
판매단가(원/kWh)	67.3	235.8	381.6

나라의 2008년도 grid parity인 68.9원/kWh 값과 [49-50] 매우 유사한 값을 갖는다. 반면 발전단가는 85원/kWh로 계산되어 이는 앞서 발표된 자료 보다 다소 낮다.

반면 울돌목의 경우 발전단가는 시화호의 경우 보다 5.7배 비싸고 경제성을 맞추기 위한 판매단가도 약 400원/kWh 이상으로 유지되어야 하기 때문에 경제성이 떨어진다. 이는 전적으로 높은 건설비용에 의존하는데 아직 조류식 발전 산업이 초기 단계라 장비가 고가이며 강한 조류가 흐르는 상태의 건설에 따른 높은 비용 때문이다. 또한 1 MW급이므로 아직 규모의 경제성이 적용되지 못한 결과라 하겠다. 그러나 울돌목은 댐 방식에 비해 훨씬 친환경적이고 이러한 친환경적으로 얻어지는 수익을 수치화 한다면 다른 결과가 예상 될 수 있다.

본 논문에서 수행된 시화호 경제성 분석에 사용된 자료들은 수자원공사에서 발표한 값을 기본으로 하였는데 발표된 건설비용은 아마도 1994년도에 완공되었던 시화호 담수호 자체의 건설비용 즉, 조력발전의 부지 조성을 위한 비용이 배제된 걸로 생각된다. 따라서 시화호의 경제성을 엄밀하게 분석하기 위해서는 시화호 조력발전소 건설에 필요한 비용에 부지 조성 비용이 더해져야 한다. 즉 시화호 조성에 소요된 총 건설비용이 필요하다. 이를 위해서 미국의 EPRI 자료를 참고하였는데 [5] 미국 내 조력발전소의 경제성 평가가 이루어진 7개 지역의 부지 조성비용 및 건설비용과, O&M 비용 평균값을 이용하여 시화호 조력발전소의 경제성을 재평가하였다. 그 외 다른 모든 조건은 시화호 조력발전 경제성 평가에 이용한 데이터를 이용하였고 그 결과를 Table 5에 정리하였다. 이자를 포함한 총 비용은 case 1에 약 3.7배이며 O&M 비용도 약 2배가 컸다. 이러한 가정과 조건하에서의 발전단가는 254원/kWh로 증가하여 case 1보다 약 3배 이상이며 따라서 손익분기점 이상이 되려면 발전단가도 236원/kWh 이상이 되어야 하는 결과가 계산되었다.

6. 결 론

현재 전 세계적으로 기후변화 대응을 위해 신재생 에너지의 개발과 이용에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 조력에너지는 다른 재생에너지의 비해 예측 가능하고 안정적인 공급이 가능한 고급 자원이다. 따라서 이에 대한 관심이 증대되고 있다.

본 논문에서는 조력에너지 대한 세계적인 연구 및 개발 동향을 고찰하였고 다양한 자료와 여러 가지 가정과 조건하에서 시화호 조력발전소와 울돌목 조류발전소의 경제성을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 현재 지형적, 물리적으로 조력발전이 가능한 영국, 노르웨이, 아일랜드, 이탈리아, 스웨덴, 캐나다, 중국, 프랑스, 인도 러시아, 미국 및 우리나라 등이 조력에너지 자원의 기술적, 경제적 이용 가능성을 인정하고 있으며 조력에너지 발전과 개발에 힘을 기울이고 있다.
- (2) 댐 방식 조력발전은 연구 역사가 깊고 상용화되어 기술의 신뢰성을 가지고 일부 발전소가 가동되고 있으나 상당한 환경적 논쟁이 있어 현재 조류식 조력 발전 보다 덜 주목 받고 있다.
- (3) 조류식 조력발전은 환경적 폐해가 거의 없는 것으로 평가되고 있어 댐 방식 보다 더 많은 연구가 진행되고 있다. 그러나 아직 그 규모가 수MW급 소규모이며 상용화 사례는 없다. 그럼에도 불구하고 전 세계적으로 많은 장비의 시제품과 프로젝트들이 수행 중이거나 계획 중이며 가시적인 성과가 보고되고 있다.
- (4) 시화호 조력발전인 경우 발전단가는 약 67.3원/kWh로 계산되었으나 시화호의 조성비용을 추가로 고려할 경우 254원/kWh로 증가하였다. 울돌목 조류발전의 발전단가는 약 400원/kWh로 매우 높았다. 고가인 이유는 조류식 발전 산업은 아직 초기 단계라 장비가 비싸고 높은 건설비용, 또한 아직 규모의 경제성이 적용되지 못한 결과라 하겠다. 그러나 이러한 상대적으로 매우 친환경적인 장점이 있다.

사 사

본 연구는 2009년도 한국전력거래소(KPX) 지원 및 2010년도 가톨릭대학교 교비연구비의 지원으로 이루어졌음.

참고문헌

1. International Energy Agency, World Energy Outlook 2007, (<http://www.worldenergyoutlook.org>).

2. Mazumder, R. and Arima, M.: "Tidal rhythmites and their implications", *Earth-Science Rev.*, Vol. 69, 79~95, (2005).
3. Owen, A. and Trevor, M.L.: "Future energy", Elsevier, Oxford, 111, (2008).
4. Cave, P.R. and Evans, E.M.: "Tidal stream energy systems for isolated communities, alternative energy systems-electrical integration and utilisation", Pergamon Press, Oxford, (1984).
5. Electric Power Research Institute, (www.epri.com/oceanenergy).
6. Rourke, F.O., Boyle, F. and Reynolds, A.: "Tidal energy update 2009", *Applied Energy*, Vol. 87, 398~409, (2010).
7. The effect of the moon on tidal range, (<http://www.lhup.edu/~dsimanek/scenario/img008.gif>).
8. Clarke, J., Connor, G., Grant, A. and Johnstone, C.: "Regulating the output characteristics of tidal current power stations to facilitate better base load matching over the lunar cycle", *Renew Energy*, Vol. 31, 173~180, (2006).
9. Boyle, G.: "Renewable energy power for a sustainable future" (2nd ed.), Oxford University Press, Berlin (2004).
10. Egbert, G.D. and Ray R.D.: "Significant dissipation of tidal energy in the deep ocean inferred from satellite altimeter data," *Nature*, Vol. 405, 775~778, (2000).
11. Bryden, I.G., and Melville, G.T.: "Choosing and evaluating sites for tidal current development", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, Vol. 218, 567~577, (2004).
12. Takenouchi, K., Okuma, K., Furukawa, A. and Setoguchi, T.: "On applicability of reciprocating flow turbines developed for wave power to tidal power conversion", *Renew Energy*, Vol. 31, 209~223, (2006).
13. Nova Scotia Power. Annapolis tidal power plant, (www.power.about.com/gi/dynamic/offsite.htm).
14. Gorlov A.M.: "Encyclopedia of ocean sciences", Academic Press, Oxford, 2955, (2001).
15. Russia infocenter, (<http://www.russia-ic.com/news/show/929>).
16. RESP, China Renewable Energy Scale-up Program, (<http://www.cresp.org.cn/uploadfiles/73/613/zhejiang.html>).
17. Chen, B. and Chen, G.Q.: "Resource analysis of the Chinese society 1980-2002 based on exergy-Part 2: Renewable energy sources and forest", *Energy Policy*, Vol. 35, 2051~2064, (2007).
18. Gross, R.: "Technologies and innovation for system change in the UK: status, prospects and system requirements of some leading renewable energy options", *Energy Policy* Vol. 32, 1905~1919, (2004).
19. Ferro, B.D.: "Wave and tidal energy: its emergence and the challenges it faces", *Refocus* Vol. 7, 46~48, (2006).
20. Westwood, A.: "Ocean power: wave and tidal energy review", *Refocus* Vol. 5, 50~55, (2004).
21. Tidal Energy Ltd., (<http://www.tidalenergyltd.com/technology.htm>).
22. Ocean Flow Energy Ltd., (<http://www.oceanflowenergy.com/development-status.htm>).
23. Verdant Power Ltd., (<http://www.verdantpower.com>).
24. Verdant Power Ltd., (<http://www.verdantpower.com/sdtc-award>).
25. GCK Technology Ltd., (<http://www.gcktechnology.com/GCK/pg2.html>).
26. Lunar Energy Ltd., (<http://www.lunarenergy.co.uk/News.php>).
27. Aquamarine Power Ltd., (<http://www.aquamarinepower.com/news-and-events/news/latest-news/view/51/aquamarine-power-announces-contract-with-abb-for-neptune/>).
28. Atlantis Resources Corporation Ltd., (<http://www.atlantisresourcescorporation.com/technology>).
29. OpenHydro Ltd., (<http://www.openhydro.com/news/OpenHydroPR-211008.pdf>).
30. Pulse Generation Ltd., (<http://www.pulsetidal.com/?q=node/25>).
31. Marine Current Turbines Ltd., (http://www.marineturbines.com/3/news/article/17/seagen_tidal_energy_system_reaches_full_power_1_2mw).
32. IHC Engineering Business Ltd., (http://www.engb.com/services_09a.php).
33. Blue Energy Ltd., (www.bluenergy.com).
34. SMD Hydrovision Ltd., (<http://smd.co.uk/products>).
35. Hammerfest Strom AS, Norwegian Technology for Tidal Energy, (<http://www.hammerfeststrom.com/content/view/49/82/lang,en>).
36. Clean Current Inc., (<http://www.cleancurrent.com/index.htm>).
37. New Energy Corporation Inc., (<http://newenergycorp.ca/Default.aspx>).
38. Treehugger, (http://www.treehugger.com/files/2007/06/12-megawatts_wo.php).
39. Rourke, F.O., Boyle, F. and Reynolds, A.: "Renewable energy resources and technologies applicable to Ireland", *Renewable and Sustainable Energy Rev.*, Vol. 13, 1975~1984, (2009).
40. Bryden, I.G., Grinstead, T. and Melville, G.T.: "Assessing the potential of a simple tidal channel to deliver useful energy", *Appl Ocean Res.*, Vol. 26, 198~204, (2004).
41. Bae, Y.H., Kim, K.O. and Choi, B.H.: "Lake Sihwa tidal power plant project", *Ocean Engineering*, Vol. 37, 454~463, (2010).
42. 국립해양조사원, (http://www.khoa.go.kr/info/current_energy_04.asp#).
43. 대전일보, (http://www.daejeonilbo.com/news/newsitem.asp?pk_no=776561).
44. 에너지 관리공단 신,재생에너지 센터, (<http://www.energy.or.kr/NC/NC602000.jsp>).

45. 한국수자원공사 시화지역본부, (<http://shhd.kwater.or.kr>).
46. 한국동서발전, (<http://www.ewp.co.kr>).
47. Denny, E.: "The economics of tidal energy", Energy Policy Vol. 37, 1914~1924, (2009).
48. 한국전력공사, (www.kepco.co.kr).
49. 한국전력거래소, (www.kpx.or.kr).
50. 매일경제, (<http://news.mk.co.kr/outside/view.php?year=2009&no=544543>).