

조력발전과 연계한 해류발전시스템

장경수, dongsanjang@hanmail.net

1. 해양에너지와 연안 개발

해양에너지의 개발과 연안 개발은 해양과 연안 사이의 거리만큼이나 연관성이 없는 것으로 보이기도 한다. 하지만 연안의 사전적 의미가 “강이나 호수 또는 바닷가를 따라서 잇닿아 있는 땅”이므로 그런 의미에서 바다를 가로막고 육지와 육지 또는 섬을 연결하는 방조제도 연안의 범주에 포함된다. 따라서 방조제와 연계한 해양에너지의 개발은 연안 개발과 매우 밀접한 관계가 있다고 할 수 있다. 값싼 청정에너지를 대규모로 확보할 수 있는 해양에너지의 개발은 그동안 낙후되었던 연안지역의 개발에 새로운 활력소가 될 수 있을 것이다.

해양에너지를 기계적 에너지로 변환하는 방법으로는 조력발전, 조류발전, 파력발전 그리고 해수온도차 이용기술이 있으며, 포괄적으로는 해상 풍력발전, 해양 바이오매스, 해양 수소에너지, 해상 태양광 및 태양열도 포함된다. 그 중에서 조력발전은 조석간만의 차가 큰 해안에 바다를 가로막는 방조제를 건설하고 방조제 외해와 내해의 수위차를 이용하여 발전하는 방식이며, 조류발전은 조석간만의 의해 발생하는 빠른 조류의 운동에너지를 이용하여 발전하는 방식이다.

본 논문에서는 녹색성장 국가전략이나 에너지계획에서 고려되지 않았던 “조력발전과 해류발전을 겸하는 통합발전시스템¹”을 구현하기 위한 수단으로써, 새로운 개념의 에너지 변환장치인 조력발전과 연계한 해류발전시스템을 제안하였고, 그 특이성과 경제적, 정책적 비전을 논하였다.

2. 조력발전과 연계한 해류발전시스템

2.1 기존 조류발전기술의 문제점²

영국을 비롯한 유럽과 미국 등 해양선진국을 중심으로 다양한 방식의 조류 발전기에 대한 설계개념과 원천기술을 개발하고, 실증연구가 진행되고 있다. 하지만 보통 평균속도가 2~2.5m/s 정도로 에너지 밀도가 낮은 조류로부터 에너지를 추출하고 있으며, 주로 수차터빈의 효율을 개선하는 방향으로 노력하고 있다. 세계 최초로 상용급 조류발전기를 개발한 영국 Marine Current Turbines 사의 Seagen 시스템은 수차터빈의 날개지름이 16m이며, 조류의 평균속도 2.4m/s에서 단위 수차발전기 당 0.6MW의 발전량을 얻었다. 한편 우리나라는 한국해양연구원을 중심으로 평균속도가 2.5m/s인 조류로부터 전기에너지를 얻고자 진도의 울돌목에 1MW급 조류발전시스템을 설치하여 실증시험 중이다.

일반적으로 조류의 평균속도가 2.0m/s 이상인 곳이 상업목적을 위해 바람직한 것으로 알려져 있지만, 조류의 속도와 해저지형 조건 등이 조류발전시스템 설치에 적합한 장소는 세계적으로도 매우 드문 실정이다.

조류발전에 의한 발전량 P_w 는 다음 식으로부터 얻을 수 있다.

$$P_w = \frac{1}{2} \eta \rho A V^3$$

여기서

- η : 수차터빈 효율
- ρ : 해수밀도, $1,025 \text{ kg/m}^3$
- A : 해류통과 단면적, m^2
- V : 해류속도, m/s

조류속도의 3제곱에 비례하여 전력을 얻을 수 있으므로 조류의 속도가 빠를수록 유리하다. 상기 발전량 식에 따라 조류의 평균속도가 2.0m/s인 곳에 설치할 단위기 발전용량 1.0MW인 조류발전용 수차터빈을 설계하려면, 수차터빈의 날개지름이 25m 이상 되어야 한다. 하지만 이정도 크기의 수차터빈은 아직까지 존재하지 않을 뿐만 아니라 수 십m 깊이의 바다 속에 수차터빈과 지지구조물 등을 포함하는 거대한 구조물을 설치하거나 설치 후 안전하게 유지·관리하는 위해서는 고도의 기술이 필요하다. 국내 울돌목 조류발전 실증시스템을 수중에 설치할 때에도 여러 차례 실패하였던 것과 같이 해양에너

지 분야는 수중에 대규모 토목구조물을 구축해야하므로 기술적 난이도와 더불어 막대한 비용이 소요된다.

2.2 조력발전과 해류발전을 연계한 통합발전시스템

우리나라 서해안은 리아스식 해안으로 조석간만에 의한 조차가 큰 지역이므로 대조차가 7m 이상, 평균조차가 5m 이상인 지역이 많아 조력발전의 잠재성이 크고 서남해안은 조류속도가 2.0~3.0m/s인 지역이 많아 조류발전에 대한 잠재성이 큰 곳으로 오래전부터 주목을 받아왔다. 일반적으로 조력발전과 조류발전의 발전원리가 다르므로 조력발전소 건설 지역과 조류발전소의 건설 지역이 서로 다르다고 생각해왔다.

하지만 조류의 속도가 느리지만 조석간만의 차가 큰 지역에 바다를 가로막는 조력발전소나 방조제를 설치하고 조력발전소 수문이나 방조제 배수갑문을 통해 해수를 유통하는 경우, 자연의 물리법칙은 낙차 5.11m 정도의 해수가 갖는 위치에너지를 다음 식으로부터 속도 약 10m/s인 해류의 운동에너지로 변환시킬 수 있다.

$$V = \sqrt{2g\Delta h} = \sqrt{2 \cdot 9.8 \cdot 5.11} = 10m/s$$

그림 1에서 그림 4는 조력발전소와 조력발전소의 해수 순환 과정에서 발생하는 고속 해류를 이용하는 해류발전을 겸하는 통합발전시스템의 일례를 보여주는 것으로써, 조력발전소와 호수측 해류발전단지와 해측 해류발전단지를 조성한 통합발전시스템의 전망과 배치 평면도 및 단면도를 보여주고 있다.

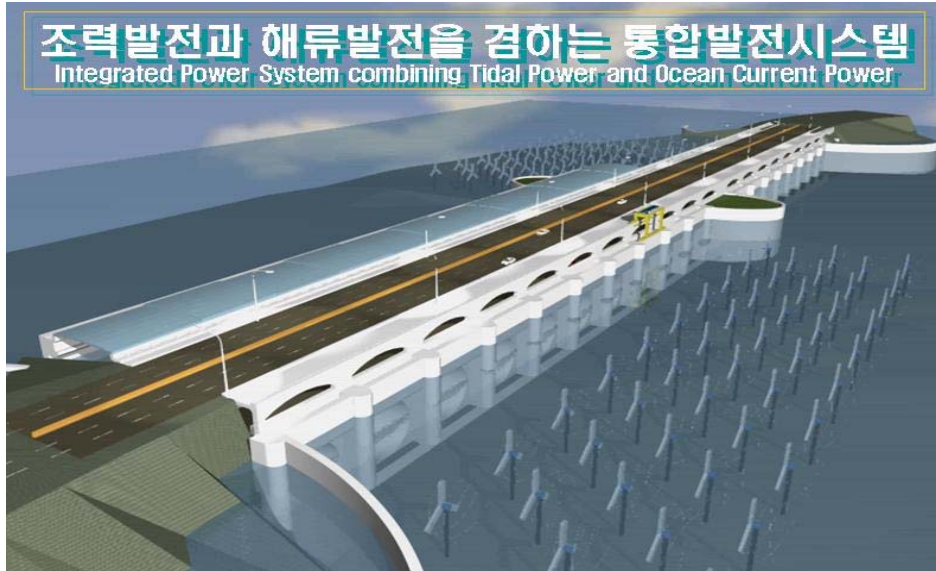


그림 1. 조력발전과 해류발전을 겸하는 통합발전시스템 조감도

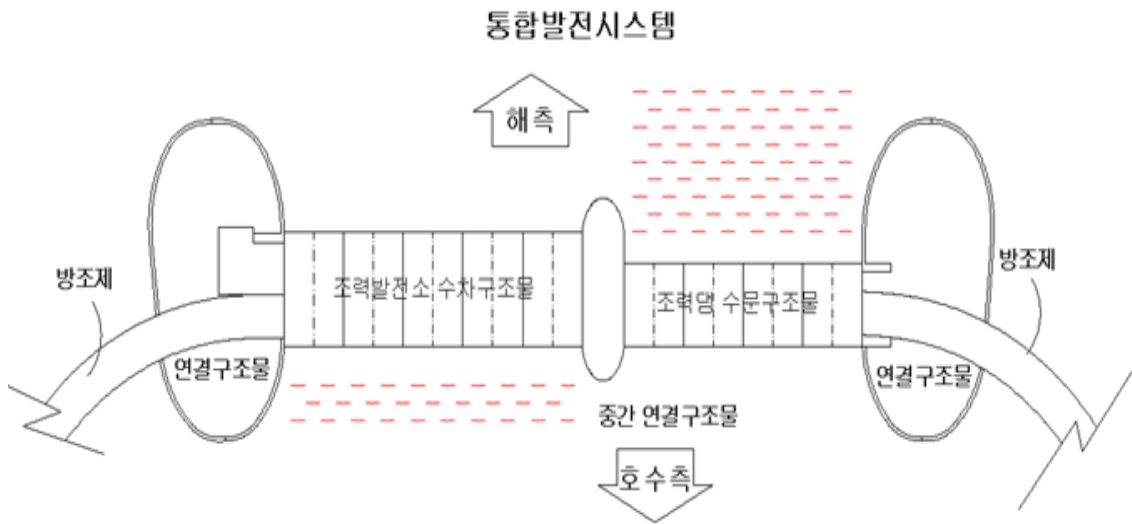


그림 2. 조력발전소와 해류발전단지를 연계한 통합발전시스템 배치 평면도

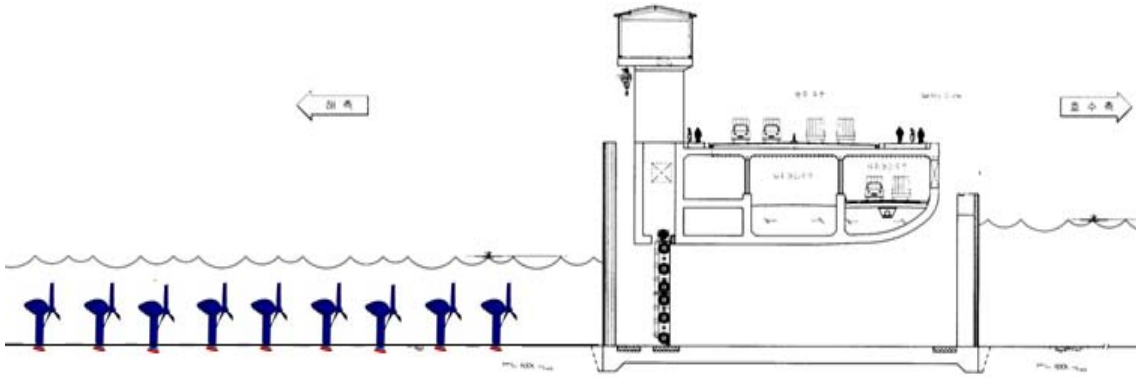


그림 3. 통합발전시스템 수문구조물과 해측 해류발전단지 배치 단면도

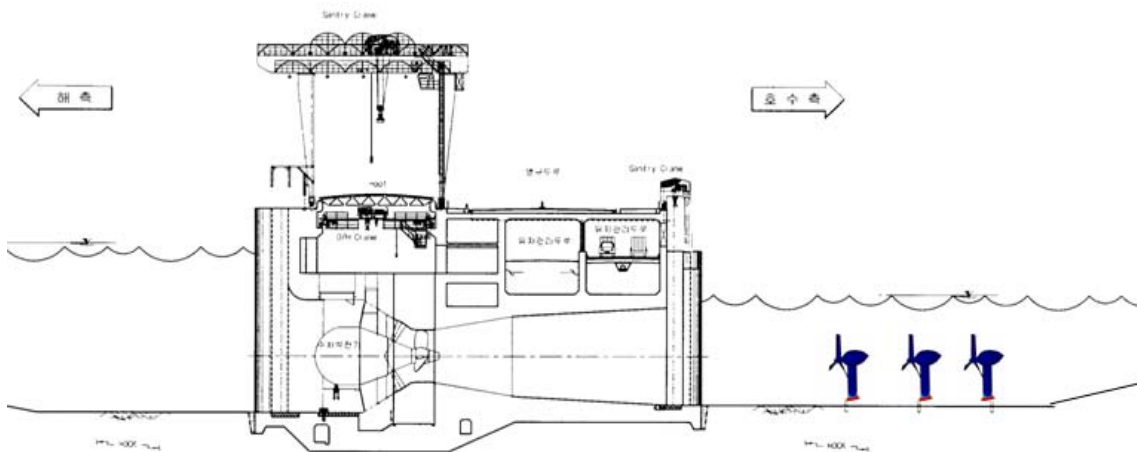


그림 4. 통합발전시스템 수차구조물과 호수측 해류발전단지 배치 단면도

2.3 고속 해류용 해류발전기의 특징

조력발전소나 방조제와 같이 바다를 가로막는 인공 해양구조물을 지나는 고속 해류를 이용하여 발전하는 해류발전기는 기존 저속도용 조류발전기와는 매우 다른 특성이 있다.

발전량이 유체속도의 3제곱에 비례한다는 점을 감안할 때, 같은 크기의 수차 터빈일 경우 2~2.5m/s의 저속도 조류를 이용하여 발전하는 기존의 조류발전보다 해수의 낙차 2~7.5m일 때 조력발전소 수문이나 방조제 배수갑문을 통해 얻을 수 있는 6~12m/s의 고속 해류를 이용하여 발전하는 해류발전은 수십~100 배 이상의 더 큰 발전량을 기대할 수 있다.

그림 5는 발전용량 4MW인 경우, 고속 해류용 해류발전기(a)와 일반적인 개

념의 저속도용 조류발전기(b) 그리고 해상 풍력발전기(c)의 크기를 비교한 것이다.

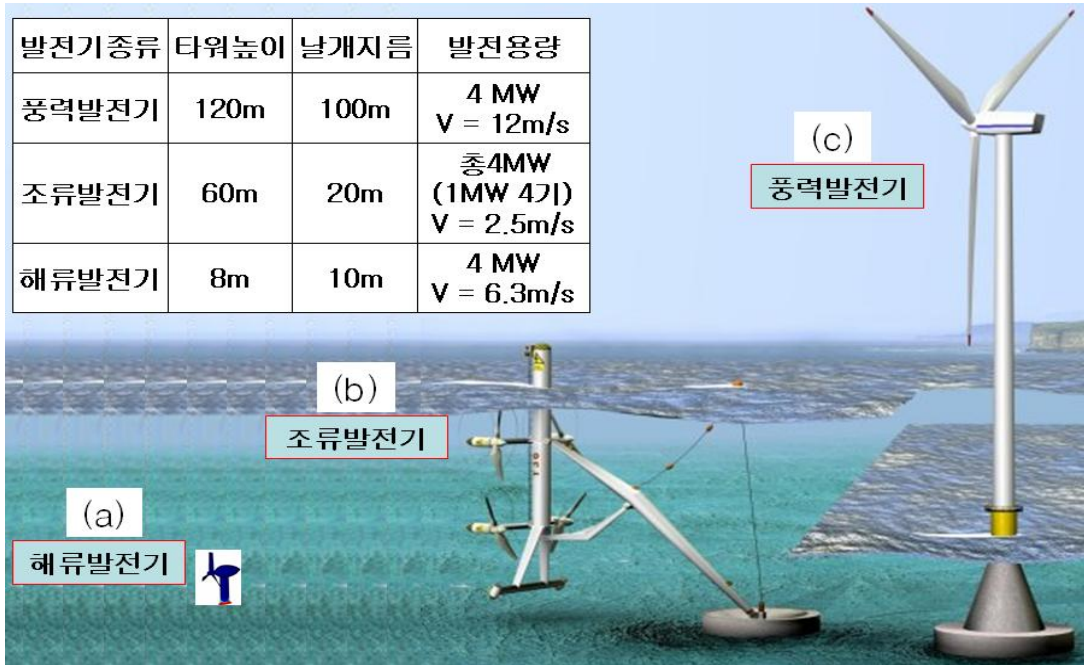


그림 5. 4MW급 해류발전기, 조류발전기, 해상 풍력발전기의 크기 비교

해상 풍력발전기 (c)의 경우 해저 구조물의 높이 20m 정도를 합쳐 타워 높이가 약 120m에 달하며, 이때 공기의 밀도가 1.2kg/m^3 일 때 바람속도 12m/s에서 4MW 전력을 생산하기 위해서는 풍력터빈의 날개지름은 약 100m 정도는 되어야 한다.

조류발전기 (b)는 영국의 Tidal Stream 사가 고안한 개념도로써, 조류속도 2.5m/s에서 날개지름 20m인 단위기당 발전용량 1.0MW인 수차터빈 4기로 구성된 4MW급 조류발전시스템을 해저 60m 깊이에 설치한 상상도이다.

고속 해류용 해류발전기 (a)는 해류속도 6.3m/s에서 4MW의 전력을 생산하기 위해 수차터빈의 날개지름이 10m 정도면 족하다. (c)와 같은 4MW급 대용량 해상 풍력발전기나 (b)와 같은 MW급 조류발전기는 현재의 국내 기술 수준으로는 단기간에 개발하여 세계시장을 주도하기는 매우 어렵다.

하지만 고속 해류용 해류발전기 (a)는 대용량이지만 소형이므로 취급하기가 용이하다. 따라서 그동안 축적된 국내의 풍력발전기 개발기술력과 조선기술

력에 집중적인 연구개발을 한다면 국내 기술력만으로도 일정기간 내에 개발이 가능하다.

한편 저속도용으로 개발된 선진국의 조류발전시스템은 고속의 해류 중에는 설치할 수가 없다. 왜냐하면 조류속도의 2제곱에 비례하여 커지는 조류의 저항 때문에 수중에 설치되는 수차발전기나 부대시설의 크기가 클수록 시공하기가 어려울 뿐만 아니라 설치한 후에도 안정적인 유지관리가 대단히 어려운 문제이기 때문이다. 하지만 조력발전과 연계한 해류발전에서는 해류발전기가 소형이어서 저항에 유리할 뿐만 아니라 기존의 조류발전시스템에는 적용할 수 없는 새로운 형태의 해류발전기 지지구조물이 가능하므로 이러한 문제점을 해결할 수 있다.

표 1은 세계 최초로 상업용 규모인 1.2MW급 조류발전시스템을 개발한 영국 Marine Current Turbines 사의 Seagen 시스템과 고속 해류용 소형 대용량 해류발전시스템을 비교한 것이다.

표 1. 영국 MCT Seagen 조류발전시스템과 해류발전시스템의 비교

구분	MCT사의 Seagen 시스템	BOP사의 해류발전시스템
활용에너지	조석간만에 의한 조류의 운동에너지	조석간만의 차가 방조제등 인공구조물에 의해 변환된 고속 해류의 운동에너지
정격발전량	0.6MW	4.0MW
터빈 날개지름	16m	10m
평균유속	2.4m/s	6.3m/s
순간 최대속도	높은 순간 최대속도 있음	순간 최대속도 없음
수차제작 난이도	대형(폭 43m)으로 어려움	소형(폭 10m)으로 용이함
개발비용	120~150억원/MW	15억원 정도/MW
접근성	바지선으로 접근	도보, 차량으로 접근 가능
유지보수/비용	어려움 / 고비용	간단 / 저비용
개발현황	실증시험 완료단계	개념단계이나 풍력 및 조류발전 기술 활용가능
경제성	미흡	매우 양호함
경쟁유무	경쟁사 다수 있음	경쟁사 없음
지적재산권	독점적 권리 없음	독점적 권리보유
신성장동력 기대효과	현재 가장 앞선 기술로 세계 주목 집중	신성장동력 국가 위상 및 코리아 브랜드 향상 기대

2.4 조력발전과 연계한 해류발전시스템의 전망

국내외적으로 저속도 영역의 조류발전장치에 대한 개발이 진척을 보이고 있고 이제 막 해외에서 상업용 조류발전기가 출시되려는 시점이나 저속도 조류를 대상으로 설계된 제품들은 조력발전소나 방조제에서 발생하는 빠른 해류 중에는 설치할 수 없다. 따라서 통합발전시스템에 설치되는 해류발전기는 고속의 해류를 이용하여 대용량의 전력을 생산할 뿐만 아니라 조력발전소 건설과정에 가물막이로 막아 댐땅인 곳에 해류발전단지를 건설할 수 있고, 아무런 소용없이 배출하였던 조력발전소 순환해수를 이용하므로 경제적 이익을 극대화 할 수 있다^{3,4}.

우리나라의 경우 현재 건설 중인 시설용량 254MW의 시화호 조력발전소 외에 시설용량 520MW인 가로림 조력발전, 시설용량 812MW인 강화도 조력발전, 시설용량 약 1,440MW인 인천만 조력발전 등이 계획 중이며, 아산만, 천수만, 새만금 등에서도 조력발전의 가능성을 검토하고 있어 대규모 해류발전 단지를 건설할 수 있는 시장이 이미 확보되어 있는 셈이다.

그림 6은 새만금 방조제에 설치되어 있는 가력배수갑문(폭 30m짜리 수문 8련)을 지나는 해류의 광경을 보여주고 있다.



그림 6. 새만금 가력배수갑문 해수유통 광경(Google 인공위성사진)

해외의 경우, 조석간만의 차가 심한 곳에서 오래전부터 조력발전의 타당성을 검토해 왔다. 프랑스 랑스 조력발전소는 약 40배 이상의 조력발전 잠재 가능성을 지닌 Chausey 만에 대한 사전 실증차원에서 건설된 것이며, 영국도 약 2,000MW 정도의 조력발전 건설 계획이 있고, 중국도 약 500MW 정도 추가로 건설할 계획이 있으며, 인도 구자라트주 캄밭만에도 시화호 조력발전소 발전시설용량의 약 23배인 5,880MW 조력발전 계획이 있다. 그 외 미국, 호주, 스페인, 러시아, 아르헨티나, 네덜란드 등에서도 조력발전 건설을 검토하고 있어 향후 시장 규모는 더욱 확대될 것이다.

3. 결론

본 제안기술은 기존 조류발전 개발기술이 당면하였던 문제점들을 해결하는 것으로써 다음과 같은 장점들이 있다.

1) 해류의 평균속도가 매우 크다.

일반적인 조류의 평균속도 2~2.5m/s 보다 3~5배 빠른 평균속도 6~10m/s의 해류를 이용하기 때문에 동일한 크기의 수차터빈에 비해 수십~백배 더 많은 전력을 얻을 수 있고 해류발전기를 매우 조밀하게 배치하여 해류발전단지를 구성할 수 있어 경제적으로 매우 유리하다⁵.

2) 맨땅에 설치할 수 있다.

조력발전소나 방조제의 건설과 더불어 해류발전단지 건설을 계획할 경우, 해류발전단지 건설예정지는 조력발전소의 전후나 방조제 배수갑문 전후가 되므로 시공 특성상 이곳을 가물막이로 막은 후 바닷물을 모두 배수하여 맨땅이 될 수 있다. 따라서 해류발전기를 바다에 설치하는 것이 아니라 육지에 설치하게 되므로 많은 비용과 시간을 줄일 수 있으며, 매우 쉽고 견고하게 해류발전단지를 설치할 수 있다. 따라서 조류발전시스템의 설치 시공상의 어려움을 모두 해결할 수 있다.

3) 접근성이 매우 뛰어나다.

해류발전단지는 조력발전소나 방조제의 수십 m 이내에 설치할 수 있다. 이 정도 거리라면 해저 케이블 설치비용이 매우 저렴할 뿐만 아니라 그림 6에서와 같이 해류발전단지와 방조제를 다리로 연결하여 차량 접근이 가능

하게 할 수도 있으므로 언제라도 해류발전시스템에 접근할 수 있다. 따라서 유지보수의 어려움을 상당부분 해소할 수 있다.

4) 조력발전소 송배전 시설을 이용할 수 있다.

조력발전을 하지 않을 때, 즉 수문을 통해 배수되는 해류의 속도가 더 빠르므로 이를 이용하여 생산된 대규모 전력은 조력발전소의 송배전 시설을 그대로 활용할 수 있어 조력발전설비의 활용도를 극대화 할 수 있다.

5) 소형 대용량 해류발전시스템은 기존의 저속도 조류발전시스템보다 훨씬 제작하기 용이하며, 대량 해류발전기가 소요되는 해류발전단지 건설 등이 수반되므로, 이와 관련된 기술개발 및 장비개발, 생산설비, 발전 및 플랜트 설비 등이 필요한 대규모 장치제조 및 발전 산업이므로 많은 인력들을 고용할 수 있는 국가 기반산업이 될 수 있다. 일반적인 저속도 조류발전에 비하여 매우 저렴한 투자비용으로 높은 수익을 기대할 수 있으며, 주로 낙후된 연안지역 종합 개발계획과 더불어 개발할 수 있는 친환경, 친생태계적인 해양플랜트 산업이므로 지역경제에 이바지할 수 있을 뿐만 아니라 국가의 새로운 미래 먹거리 산업으로도 유망하다.

참고문헌

1. “조력발전과 해류발전을 겸하는 통합발전시스템”, 특허10-0867547.
2. 에너지관리공단, 신재생에너지 RD&D 전략 2030[해양], 2007.
3. 장경수, 이정은, “조력발전소와 연계한 해류발전단지”, 한국풍력에너지학회 춘계학술 대회, 2008. 4. 8-9, 광주.
4. 장경수, 이정은, “조력발전과 해류발전을 겸하는 통합발전시스템의 타당성 연구”, 한국신·재생에너지 학회 춘계학술대회, 2009. 6. 25-27, 제주.
5. 이승호, 이상혁, 장경수, 이정은, 허남건, “조력발전소와 연계한 해류발전단지의 활용에 대한 유동해석 연구”, 유체기계공업학회논문집, 제12권 3호, 2009. 6.