

조력발전의 이해

백두현 | 한국수자원공사 에너지사업처 설비건설부장

1. 서론

너울거리는 파랑, 해수면의 상승과 하강, 해변을 집어삼킬 듯한 기세의 해일, 혹은 잔잔한 평온함 등의 여러 모습으로 인류의 삶과 밀접한 관계를 이어온 바다는 인류가 생존과 번영을 위하여 활용하였던 기존의 방법을 넘어서 새로운 모습으로 다가오고 있다. 물류의 통로로, 주요한 식량공급원, 유용한 자원의 보고 역할을 묵묵히 감당해온 바다는 이제는 에너지의 원천으로 인류문명의 진화에 또 다른 역할을 감당할 준비가 되어 있다. 여러 해양에너지 중에서도 대부분의 바다에서 하루에 두 번씩 발생하는 조석현상

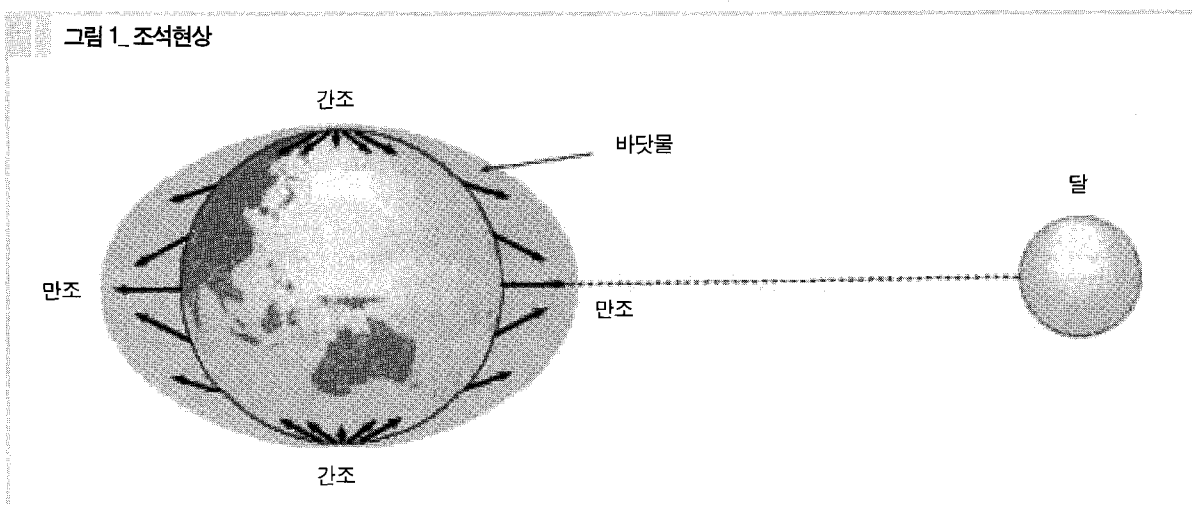
을 이용한 조력발전은 에너지추출 및 관련기술의 발전으로 대규모 상업발전이 가능하게 되었다. 여기서는 해양에너지 활용의 한 방법인 조력발전에 대하여 논하고자 한다.

2. 조력발전의 원리

가. 조석현상

조석현상은 달, 태양 등 지구 주변 천체의 인력작용에 의해 해수면이 주기적으로 상승·하강하며, 바다물이 해안에 밀려 들어왔다(들물) 쏠려 나가는(날

그림 1. 조석현상



물) 현상을 말한다. 조석현상의 원인이 되는 힘은 기 조력으로 지구표면의 원심력과(지구위치에 상관없이 크기와 작용방향이 같음) 달과 태양의 인력(지구위치에 따라 크기와 작용방향이 다름)의 차이에 의해서 나타난다. 해수면이 가장 높아졌을 때를 만조(滿潮)라고 하며 최저로 되었을 때를 간조(干潮)라고 한다. 또 해면이 상승하는 사이, 즉 간조에서 만조까지를 밀물(들물) 또는 창조(漲潮)라 하며 하강하는 사이, 즉 만조에서 간조까지를 썰물 또는 낙조(落潮)라 한다. 만조에서 만조 또는 간조에서 간조 사이의 시간을 조석주기라 하며, 우리나라의 경우, 평균 약 12시간 25분으로 하루에 만조와 간조가 2회씩 나타나며, 그 시각은 매일 수십분씩 늦어진다. 연속되는 만조와 간조 또는 간조와 만조 사이의 수위차를 조석간만의 차(差) 또는 줄여서 조차(潮差)라 한다. 최대의 조차는 대개 신월(新月, 음력 초하루) 및 만월(滿月, 음력 보름) 전후에 나타나며, 이를 사리 또는 대조(大潮)라 하고, 상현 및 하현 때는 조차가 작아 조급 또는 소조(小潮)가 된다.

나. 조력발전

바다가 보유하고 있는 에너지를 인간이 활용할 수 있는 발전방식에는 파랑을 이용한 파력발전, 표층수와 심층수의 온도차를 활용하는 온도차발전, 바다물의 흐름(조류)을 이용하는 조류발전 등이 있으나 현재까지 대규모로 상용화된 것은 조력발전이다. 조력발전은 조석을 동력원으로 하여 해수면의 상승하강 현상을 이용, 전기를 생산하는 발전방식이다. 이 조력발전에는 일정중량의 부체가 받는 부력을 이용하는 부체식, 조위의 상승하강에 따라 밀실에서 공기를 압축시키는 압축공기식 및 조석이 강하게 발생하는 하구나 만을 방조제로 막아 해수를 가두고, 수차발전기를 설치하여 외해와 조지(해수호)의 수위차를 이용하여 발전하는 방식으로 나눌 수 있다. 조지식 조

력발전방식은 일반적으로 조지수에 따라 단조지식과 복조지식이 있으며, 조석의 이용횟수에 따라 단류식과 복류식으로 나누고 있다.

조력발전 방식

- 단류식 창조발전 : 밀물시 바다와 조지(호수)의 수위차에 따라 발전을 하고 썰물시 해수 호의 물을 방류하는 발전방식
- 단류식 낙조발전 : 밀물시 수문을 열어 호수를 채운 후 수문을 닫고 썰물시 바다와 조지(호수)의 수위차에 따라 발전하는 방식
- 복류식발전 : 바다와 조지(호수)의 수위차가 발생하면 밀물과 썰물의 양쪽방향으로 발전 하는 방식

3. 시화조력 개발현황

가. 개발배경

1994년 2월 시화지구 간척사업의 일환인 방조제 공사가 완료된 후, 조류유통이 차단되고 인근지역으로부터 유입된 오염 물질이 축적되어 시화호의 오염이 증가하자, '01년 2월 정부에서는 시화호 수질개선 대책으로서 시화호를 해수호로 관리하기로 결정하였다. 또한, '02년 12월 시화호 관리위원회에서는 시화호 종합관리 세부시행 계획을 심의·의결하여 시화호 수질개선을 위해 조력발전사업을 추진키로 의결함에 따라 한국수자원공사는 시화호의 해수유통에 따라 발생하는 조력에너지를 이용하고자 타당성조사를 실시하였다.

시화호 및 방조제현황

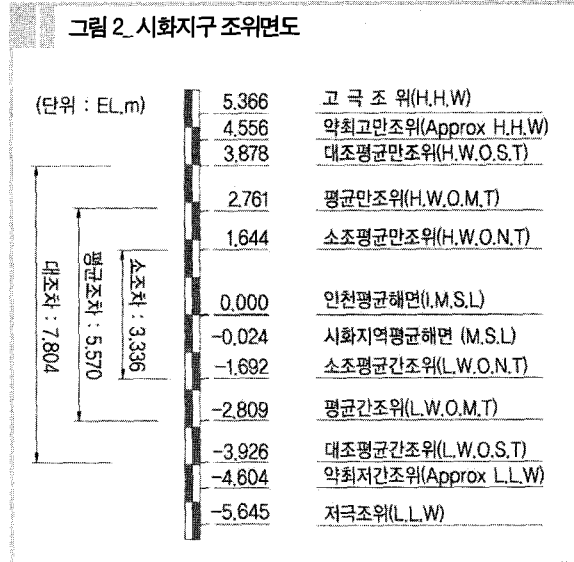
- 총 저수용량 : 281백만m³
- 유효저수용량 : 191.48백만m³

- 홍수위 : EL. +0.18m
- 관리수위 : EL. -1.0m
- 담수면적 : 43.93km²
- 유역면적 : 405.72km²
- 방조제 연장 : 12.7km
- 배수갑문 : 2개소(2,386m³/sec)

나. 조력발전방식 선정

시화조력은 조지가 하나인 단조지 방식으로 선정 가능한 발전방식은 복류식 발전방식과 단류식 낙조 발전 및 단류식 창조발전등이 있다. 시화지구의 평균 조차는 5.57m로서 복류식 발전을 위해서는 조차가 적은 편이다.

일반적으로 단류식 방식 중 간석지 개발의 측면에서는 넓은 조간대를 제공하는 창조식 발전방식이 적합하고, 에너지생산의 관점에서는 경사진 해안선에 의하여 큰 가용조지공간을 가지는 낙조식 발전방식이 유리하다. 시화지구 간척사업의 외곽시설인 시화 방조제는 포화상태에 있는 수도권에 공업용지를 조성하여 공장이전을 촉진하고 우루과이 라운드에 대비한 우량농지 조성, 도시근교 첨단복합 영농단지 등을 목적으로 축조되었기 때문에, 이 목적의 실현을



위해서는 시화호의 관리수위가 평균해수면(EL. -1.0m)이하로 유지되어야 한다. 따라서 조지수위의 제한으로 인한 넓은 조간대의 개발이 가능한 단류식 창조발전이 적합한 것으로 나타났다.

다. 최적개발규모 결정

➔ 시설용량

일반적으로 개발지점에서 최적의 조력발전소 시설

(표 1)시화호 조력발전 방식별 특성 비교

| 구 분 | 단 류 식 | | 복 류 식 |
|------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | 낙 조 식 | 창 조 식 | |
| 발전원리 | • 낙조식 발전 • 창조식 충수 | • 창조식 발전 • 낙조식 배수 | • 창조식, 낙조시에 모두 발전 |
| 사용수량 | 100% | 100% | 단류식보다 1.3~1.5배 정도 증가 |
| 시화호 수위변동 | 고조위와 관리수위 사이 | 저조위와 관리수위 사이 | 고조위와 저조위 |
| 발전량 | 많음 | 약간 적음 | 많음 |
| 조간대 개발가능여부 | 불가 | 가능 | 불가 |
| 시화호 적용가능여부 | 불가 | 가능 | 불가 |
| 선정 | | ○ | |

규모(예로 발전단가가 최소가 되는 시설규모)를 결정하려면 수많은 변수를 고려해야 하고, 이것들이 복합작용을 하기 때문에 해석적으로 규모를 결정하기는 어렵다. 따라서 최적개발규모를 결정하기 위해서는 컴퓨터에 의한 반복계산법에 의존할 수 밖에 없다. 그러나 시화조력은 이미 방조제가 들어서 있어 조지의 가용공간, 평균조차등의 변수가 이미 결정되었기 때문에 이에 따른 개략적인 시설용량의 산출이 가능하다. 시화조력은 창조식 발전방식으로 조지의 가용공간은 관리수위(EL.-1.0m)와 평균간조위(EL.-2.81m)사이로 약 8천만^m이며, 평균조차는 5.57m이다. 조석 당 발전가능시간(약 5시간)이 주어지면 사용수량을 구한 후 손실수두 등을 고려 후 시설용량산정방법에 의하여 개략적인 시설용량이 산정되는데 시화조력의 경우 대략 254MW(25.4MW×10)로 산정되었다.

➔ 창조식 발전

창조식 발전방식을 간략하게 설명하면(그림3 참조), 썰물시 조지(호수)와 외해의 수위가 같아지면 수문과 발전설비의 도수로(오리피스의 역할)를 통하여 간조위까지 조지(호수)의 수위를 낮춘 후 수문을 닫는다. 다시 밀물시 외해의 수위가 상승하여 발전이 가능한 낙차(약 2.0m)가 형성되면 발전을 시작(수차 개방)한 후 외해수위의 하강과 조지(호수) 수위의 상승으로 발전이 가능한 최저 수두차(약 1.0m)가 되면 발전을 정지한 후, 외해수위가 조지(호수)의 수위보다 낮아지게 되면 배수를 시작하게 된다.

➔ 수차선정

조력발전설비에서 수차발전기가 차

지하는 비중은 높아서 제작비, 시공성 등 여러 가지 요인을 고려하여 적절한 수차발전기를 선정하여야 한다. 발전기실의 크기는 수차발전기의 제원에 따라 결정되고, 이에 따라 수문의 수와 크기도 수차의 통수량에 영향을 받는다. 조력발전은 유량의 제한은 거의 없으나, 낙차는 수력발전에 비하여 무척 작기 때문에 이러한 조석에너지를 활용하기 위해서는 저녁차 대유량의 수차발전기가 필요 하게 된다. 일반적으로 조력용 수차는 다음의 사항을 고려하여야 한다.

- 지속적으로 변하는 저녁차의 조건하에서 운전특성과 효율이 좋아야 한다.
- 해수에 직접 노출되는 부분은 재질 및 도료선정시 방식을 고려하여야 한다.
- 조석주기에 따르는 발전소운영은 수차발전기에 부담을 준다.

상기의 요구조건을 만족시키는 수차로서 벌브형(Bulb type) 수차가 있으며, 프로펠러 형의 러너블레이드를 사용하고 있고 벌브 케이상내에 수차와 직결되어 있는 발전기를 가지고 있다. 최근에 설치된 대부분의 대형 저녁차 수력발전에도 벌브수차를 채용

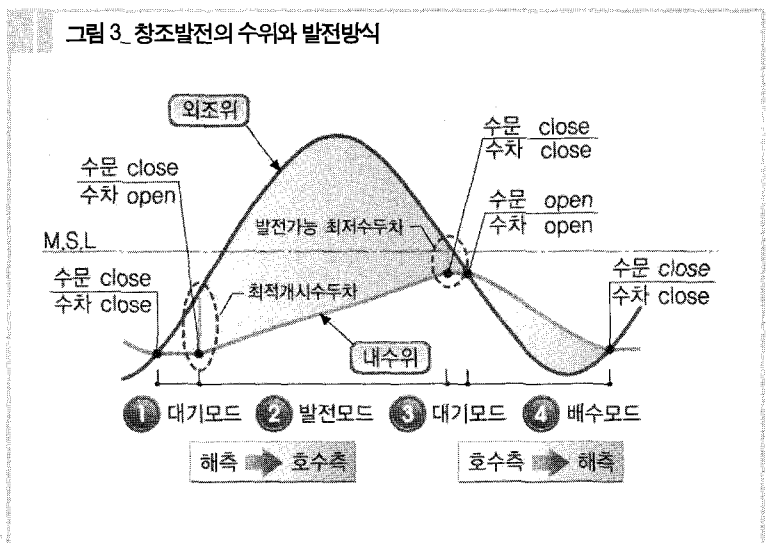
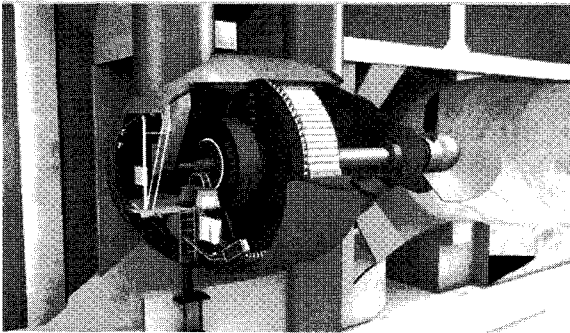


그림 4_ 시화조력 수차발전기



용하고 있다. 따라서, 시화조력의 경우, 저낙차 및 대유량 조건에 적합한 벌브수차를 적용하였다. 벌브수차는 윗켓게이트(가이드베인)와 회전날개(런너 블레이드)를 함께 조정하는 복조정식 방식이다. 회전날개 3개인 회전수 64rpm의 수차는 어류의 통과시 생존율을 최대한도로 높이기 위하여 친어적(fish-friendly)인 특성을 갖고 있다.

※ 시화조력발전소 설비 개요

- 시설용량 : 254MW(25.4MW×10기)
- 수차형식 : (비양수) 횡축 벌브형 카플란수차
- 사용수량 : 482.13m³/sec
- 수차회전수 : 64.29rpm
- 수문설비 : B15.3×H12.0m×8련, 수직인양식 롤러게이트
- 송전선로 : 154kV, 2회선

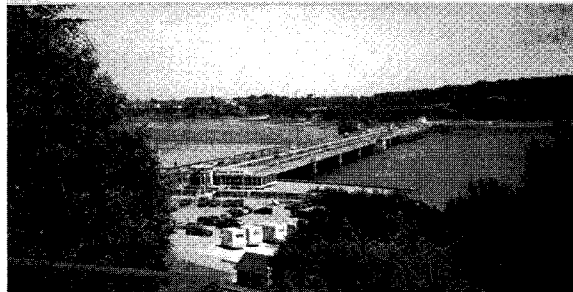
4. 해외조력개발 현황 및 전망

가. 해외개발현황

➔ 프랑스

현재 세계에서 대규모로 상업운전을 하고 있는 조력발전소는 프랑스 북서부의 영불해협으로 들어가는

그림 5_ 랑스조력발전소



랑스강의 하구에 위치하고 있는 랑스조력발전소이다. 1960년에 착공되어 1966년에 상업발전을 시작한 랑스조력발전소는 Chausey 섬 주변에 1,200만 kW급의 대규모 조력발전소 건설을 추진하기 위하여 실험용으로 건설되었다. 그러나 프랑스의 에너지정책이 원자력 위주로 전환함에 따라 초대형 규모의 조력개발사업은 중단되었다. 랑스조력의 발전방식은 단조식 복류식(양수기능 포함)으로 창조 및 낙조시 발전이 가능하며, 조수가 정지상태일때, 조지(호수) 혹은 외해로 양수할 수 있도록 건설되었으나 환경적인 고려 후, 단류식 낙조발전으로만 운영하여 왔다. 랑스조력은 최대조차 13.5 m, 평균조차 8.5 m로서, 750 m의 방조제와 면적 22 km²의 조지를 보유하고 있다. 발전방식은 단위기 10 MW의 벌브형 수차가 24대 설치되어 연간 544 GWh의 전력을 생산하고 있다.

➔ 캐나다

캐나다 노바 스코티아(Nova Scotia)지방의 펀디(Fundy)만은 전 세계적으로 조석이 16 m까지 발생하는 몇 안 되는 지역으로 이 펀디만의 잠재조력을 활용하기 위한 실험용 조력발전소로 건설된 것이 아나폴리스 조력발전소이다. 유역 내에 배수를 원활히 하고 구(舊)도로를 대체할 목적으로 건설된 아나폴리스 강 입구의 제방이 조력발전소 적지로 선정될 수 있었던 것은 제방을 방조제로 사용함과 동시에 홍수 조절용 수문을 조지충수용(아나폴리스 조력은 단류

그림 6_아나폴리스 조력발전소



식 낙조발전방식임)으로 활용함으로써 비용절감을 꾀할 수 있었기 때문이다. 아나폴리스 조력발전소의 특징은 저낙차수차에서 주로 적용되던 벌브형 대신 림타입 스트라플로(Rim type straflo) 형으로 이 런너의 끝단에 발전기 회전자가 붙어 있고 회전자의 바깥둘레에 고정자가 배치되어 있는 형식이며, 수차 구조물은 기존의 섬위에 건설하였다. 평균조차는 7.0 m, 조지면적 11.5 km²으로 20 MW의 스트라플로(straflo) 수차발전기 1기가 설치되어 연간 50 GWh의 전력을 생산하고 있다.

➔ 러시아

러시아의 대부분 조력발전 후보지는 북극지방에 위치하여 연간 200일정도 결빙이 계속되는 악조건의 기후를 가지고 있으나 Ura Guba 동쪽의 키슬라야 구바 지역은 조차는 작으나(1.0~3.9m), 겨울에도 비교적 온화하여 조력자원개발을 위해 소형 실험용 발전소 건설을 위한 입지조건으로서는 우수하여 1938년 키슬라야 구바에 조력발전소 건설을 제안하였고, 이후 1940년대부터 본격적으로 계획되어 1968년에 준공되었다. 키슬라야 구바 조력발전소의 주목할 점은 케이슨공법(부유건설공법)을 도입한 최초의 조력발전소라는 점이다. 이는 육상이나 독(dock)에서 발전설비를 제조 및 조립하고, 이것을 물위로 띄워서 예항(曳航)하거나 대형 크레인선으로

운반하여 미리 준설한 기초 위에 설치하는 공법으로, 이는 해상에서의 Dry work를 위한 코퍼댐(가물막이) 축조 비용의 절감을 가능하게 하였다. 키슬라야 구바 조력발전소는 복류식 발전방식으로 0.4 MW 벌브형 수차가 1기가 설치되어 연간 1.2 MWh의 전력을 생산하고 있다.

➔ 중국

중국은 조력에너지 부존자원이 풍부하여 1950년대 후반부터 조력자원 개발연구가 수행되었으며, 소규모의 많은 조력발전소가 설치되었으나 대부분 폐쇄되고 현재 가동되고 있는 것은 지양시아조력발전소 등 8개소이다. 폐쇄된 50여 개소의 발전소의 수명이 짧았던 주요 원인으로는 현장자료 부족에 의한 부적절한 입지선정, 설계상의 오류, 계통인입의 실패, 관리미숙 등으로 규명되었다. 지양시아 조력발전소는 간척지개발사업을 위한 제방준공시 조력발전소 사업을 계획하여 추진되었으며, 복류식 발전방식을 채택하였다. 0.5 MW 1대, 0.6 MW 1대, 0.7 MW 3대로 다양한 용량의 수차로 총 3.2 MW의 시설용량이 설치되었으며 연간 6 GWh의 전력을 생산하고 있다.

나. 개발전망

기후변화협약 등 온실가스 배출에 대한 규제, 부존자원의 제한으로 인한 미래에너지산업에 대한 불안

그림 7_지양시아 조력발전소



(표 2) 해외 조력발전소 운영현황

| 국가명 | 위치 | 평균낙차(m) | 조지면적(km ²) | 시설용량(MW) | 비고 |
|-----|-----------|----------|------------------------|----------|----|
| 프랑스 | 랑스(Rance) | 8.5m | 22 | 240 | |
| 캐나다 | 아나폴리스 | 7.0m | 11.5 | 20 | |
| 러시아 | 키스라야 구바 | 1.0~3.9m | 1.1 | 0.4 | |
| 중국 | 지양시아 | 5.08m | 1,37 | 3,2 | |

(표 3) 세계의 조력발전소 개발계획

| 국가명 | 조력지점 | | 최대지점 | | | |
|-------|------|----------|---------------|---------|------------------------|----------|
| | 지점수 | 시설용량(GW) | 위치 | 평균낙차(m) | 조지면적(km ²) | 시설용량(GW) |
| 러시아 | 7 | 113 | Penshinsk(s) | 6.2 | 20,530 | 87.4 |
| 프랑스 | 3 | 50.24 | Cotentin | 8.0 | 4,750 | 50.0 |
| 영국 | 9 | 31.3 | Severn | 8.3 | 480 | 8.6 |
| 캐나다 | 4 | 6.7 | Cobequid, B9 | 11.8 | 264 | 4.0 |
| 미국 | 9 | 4.4 | Knik-Arm | 8.4 | 1,600 | 1.4 |
| 브라질 | 2 | 4.2 | Sao Lais | - | - | 4.1 |
| 아르헨티나 | 4 | 18.0 | San Jose(G,N) | - | - | 5.3 |
| 인도 | 4 | 9.6 | Cambay | 6.8 | 1,972 | 7.4 |
| 중국 | 9 | 21.6 | Luoyuanwan | 5.2 | 160 | 0.5 |
| 한국 | 4 | 4.4 | Inchon | 5.9 | 200 | 0.8 |
| 호주 | 2 | 2.3 | Walcott | - | 264 | 1.8 |

감, 불안정한 국제원유시장 등은 세계 각국의 대체에너지 개발노력으로 이어지고 있다. 과거에는 방조제, 대형 저낙차 발전설비 등 해양에너지를 추출하기 위한 설비가 고가로 경제성이 확보되지 못하였으나, 현재는 관련기술의 발전과 대체에너지에 대한 정부의 지원정책, 환경에 대한 관심이 높아지면서 여러 곳에서 개발을 위한 조사가 이루어지고 있다. 대표적인 곳으로는 영국의 세번만, 캐나다의 펀디만, 러시아의 펜진스크등이 있다.

5. 결론

인류의 개발지상주의에 따른 무분별한 화석연료의

사용으로 인한 온실가스 배출로 인하여 지구온난화 등 지구의 환경을 위협하는 현상들이 발생하고 있다. 해양에너지의 한 종류인 조석현상은 주기적인 지속성과 무한성으로 인하여 과거로부터 주목받아 왔다. 그러나 이러한 인간의 생활주기와 맞지 않는 조석주기, 초기시설 투자비의 과다 및 환경적인 장애물로 인하여 대규모의 개발은 이루어지지 않았던 것이 사실이다. 그러나, 개발과 사용이 수월하여 세계산업발전에 원동력이 되어왔던 화석연료가 지금은 제한된 부존량, 공해물질 배출로 인한 지구환경 오염 등 인류생존을 위협하는 주요 요소로 등장하였다. 이런 점에서 조력발전은 예측가능하며, 태양계가 지속가능한 영구히 존재한다는 점에서 미래에너지산업의 큰 매력이 아닐 수 없다.