



# 조력발전 기술 및 현황

■ 김 규 호 / 안산공과대학 교수  
 ■ 권 석 기, 김 태 훈 / 한국전력거래소

## 1. 조력발전의 원리

해양에너지의 하나인 조력발전은 바다의 밀물과 썰물의 차이를 이용하는 발전으로서 <그림 1>과 같이 조석(ebb and flow)이 발생하는 하구나 만을 방조제로 막아 해수를 가두고 수차발전기를 설치하여 외해와 조지내의 수위차를 이용하여 발전하는 방식이다.

수력발전소와 비슷한 원리이나 수력발전의 낙차가 수십m인 데 비해 조력발전은 낙차가 보통 10m 이하라는 점이 다르다. 또한, 밀물 때 수문을 열면 물이 쏟아져 들어오면서 터빈을 돌려 발전하게 되고, 썰물 때는 터빈의 날개가 반대 방향으로 돌면서 다시 발전하게 되는데 조수의 방향 변화에 따라 두 가지 문제가 발생한다. 첫째, 조수의 힘이 계속해서 바뀌다가 간조(low tide) 때와 만조(high tide) 때는 조수의 흐름이 정지되므로 이 힘도 제로가 된다. 즉, 조수의 힘이 하루에도 여섯 시간 마다 제로로 떨어지거나, 조위가 일정한 시간대에서는 발전할 수 없다는 등 변화가 심하기 때문에 조력발전을 계통에 연계할 때는 전력수급에 세심한 고려를 해야 한다. 둘째, 조수의 미치는 범위에도 변화가 있다. <그림 2>에서 알 수 있듯이 보름달이거나 그믐달일 때는 달, 지구, 태양이 일직선으로 늘어서는 사리(대조, spring tides)시에는 서로 끌어당기는 힘이 강해져서 바닷물도 높이 찻다가 밀러가기를 반복하기 때문에 조수의 힘도 가장 강해진다. 그러나 달, 지구, 태

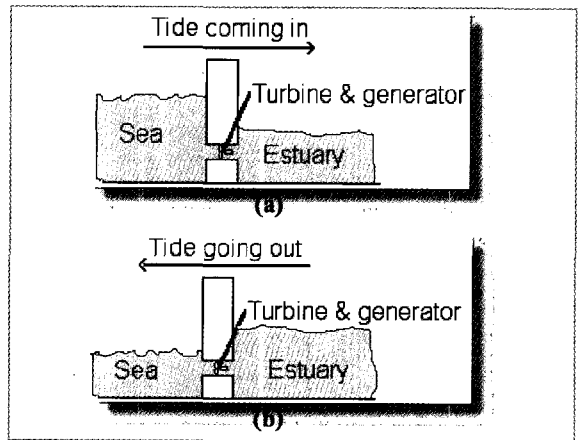


그림 1 밀물과 썰물에 따른 발전방식

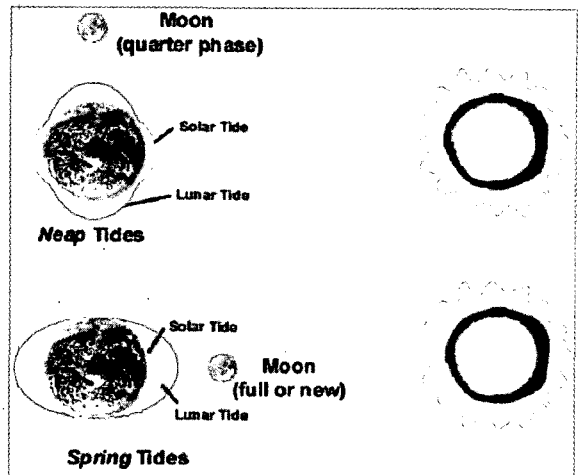


그림 2 조석현상 및 해수면의 변화 원인

량이 직각으로 배열되어 반달이 되는 조급(소조, neap tides)시에는 끌어당기는 힘이 약해지고 조수의 힘도 약해진다. 즉 조수의 미치는 범위가 연중 주기적으로 변하기 때문에 조수의 힘에 따른 전력공급 능력에 주의할 필요가 있다.

## 2. 조력발전의 종류

### 가. 단류식 발전

단류식 발전은 낙조(썰물)류나 창조(밀물)류 중 하나의 흐름만 이용하여 발전한다.

#### 1). 창조발전

〈그림 1〉의 (a)에서 알 수 있듯이 조류의 방향이 창조시 즉 외해에서 조지 방향으로 흐를 때에 발전하는 것을 창조발전(Flood Generation)이라 한다.

#### 2). 낙조발전

〈그림 1〉의 (b)와 같이 조지에서 외해 방향으로 발전하는 방식으로 낙조발전(Ebb Generation)이라 한다.

#### 3). 낙조양수발전

낙조양수발전(Ebb Generation Plus Pumping at High Tide)의 개념은 더욱 효율적이다. 만조 직후 수문을 닫고 수차를 역회전시켜 외해에서 조지로 양수하여 양측 낙차가 커져 양수가 비경제적일 때 중지한다. 또한 양수에 사용된 전력과 추가로 발전된 전력의 가격을 비교하여 침두 부하시간대 전에 양수하여 침두부하 시간대에 맞춰서 발전하면 상당히 유리하다. 대조시 수차는 최대 출력으로 운전하여 발전량을 극대화 시킨다.

### 나. 복류식 발전

창조발전과 낙조발전을 조합하면 발전량을 두 배로 늘릴 수 있고, 조지내의 조차 변동폭도 넓어지고 기존 조석과 비슷해지

면 환경문제도 없을 것이다. 〈그림 3〉은 복류식 발전 주기를 나타낸 것이다. A점에서 낙조 발전을 시작하고, B점에서 수문을 열어 낙조를 이용하여 저조 때까지 조지 수위를 계속 낮춘 후 조지 수위와 외해 조석간의 수위가 같은 C점에서 수문을 닫는다. 발전 수두차가 날 때 까지 기다렸다가 조지 수위가 높아진 D점에서 수문을 다시 열고 수차를 역회전하여 창조발전을 한다.

낙조와 창조 발전 사이에 수문을 개방하여 해수를 방출하므로 발전에 사용되는 수량도 줄어들고, 창조식 발전시 수차의 역방향 발전으로 인한 효율 저하로 복류식은 단류식보다 발전량이 작다. 따라서 같은 발전량을 내려면 수차 대수가 늘어나므로 단류식 보다 10% 정도 더 비싸다. 그러나 수차의 발전 수두가 낮아지면 최대 출력이 낮아지고, 매조석당 두 번 발전하므로 계통인입이 쉬운 이점도 있다. 복류식 발전의 약점은 조지 수위가 낮아지므로 조지내 위치하는 항구에 수심유지 문제가 생길 수 있다.

결과적으로 낙조발전이 운전에서 가장 간단하고 경제적인 발전방식이고, 수차구조도 간단하여 유지비도 적게 든다. 낙조양수 발전은 선박 항해에 이점을 주지만 순 에너지가 증가되는 조석의 수는 제한된다. 복류식 발전단가는 더 비싸지만 하루 네 번 발전하여 계통

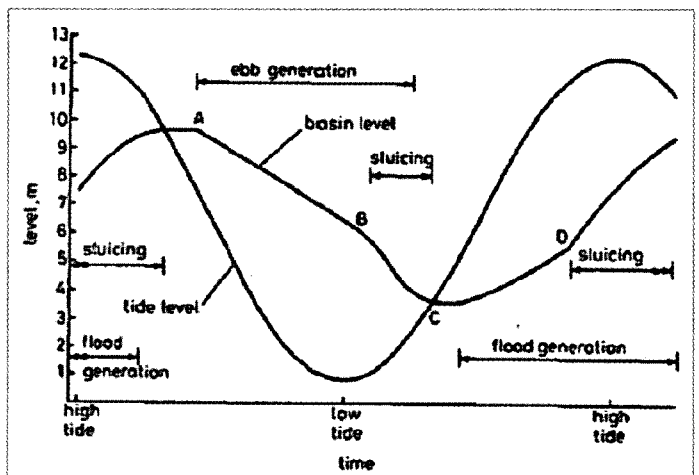


그림 3 복류식 발전 주기

인입이 더 쉬워 두 번 발전하는 단류식 보다 유리한 점도 있다.

### 3. 해외 조력발전 현황 및 특징

우리나라를 포함하여 현재 조력발전소를 운영 중에 있거나 개발 계획에 있는 지역의 평균낙차, 조지면적 및 시설용량 등에 관하여 <표 1>에 간략히 나타내었다.

#### 가. 프랑스 Rance 조력발전소

Rance 조력발전소는 프랑스 전력계통에 큰 기여를 하고 있으며, 그동안 발전소 운전 경험과 기술적 능력을 풍부하게 보유하고 있다. <그림 4>는 Rance 조력발전소의 전경이다.

##### 1). Bulb 수차 · 발전기

프랑스 Rance 조력발전소는 Bulb형 수차 · 발전기 24대가 설치되었으며 주요 제원은 다음과 같다(<그림 5> 참조).

- Kaplan 수차 : 유량 275m<sup>3</sup>/sec
- 발전기 : 단위기 용량 10mw, 직경 5.4m, 93.75rpm, 2Bar(절대압력)에서 가동, 4Unit의 Assembly는 3.5/220kV 변압기 용량 80MVA로 Tertiary로 구성되며, 6Unit Assembly, 3대의 변압기가 있다.

- Bulb 수차는 Kaplan형 Runner의 상류에 수밀된 강제 Bulb 내부에 발전기가 있다.

- 발전기 냉각은 수냉식도 있으나 최근에 제작된 대형 Bulb 수차는 대부분 공랭식이다. 그리고 Bulb 내부의 고기압을 2기압까지 높여 냉각효율을 증가시키고 동시에 Bulb 내부와 외부의 압력을 감소시키는 효과도 있다. 공기는 회전자와 고정자간의 통로를 통해 강제 순환되어 Bulb 바깥 물속으로 열을 전도시키는 수냉식 방열기를 통과시켜 냉각된다.

표 1 조력발전소 운영 및 개발계획 현황

구분	국가명	위 치	평균낙차 (m)	조지면적 (km <sup>2</sup> )	시설용량 (MW)
운 영 중	프랑스	랑 스	8.5	22	240
	캐나다	아나폴리스	7.0	11.5	20
	러시아	키스라야구바	1.0~3.9	1.1	0.4
	중국	지양시아	5.08	1.37	3.2
개 발 및 계 획	한국	시화지구	5.64	43.93	254
	러시아	펜진스크	6.2	20,530	87,400
	프랑스	코텐틴	8.0	4,750	50,000
	영국	세 번	8.3	480	8,600
개 발 및 계 획	캐나다	코베퀴드	11.8	264	4,000
	미국	닉 -암	8.4	1,600	1,400
	인도	캠베이	6.8	1,972	7,400
	중국	류오유안완	5.2	160	500

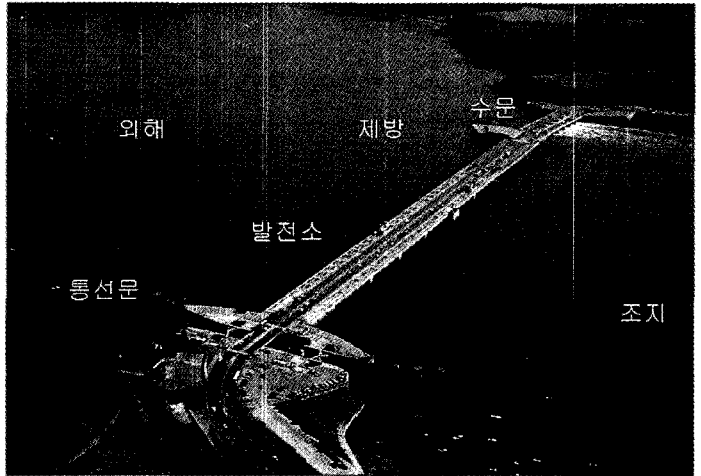


그림 4 Rance 조력발전소의 전경

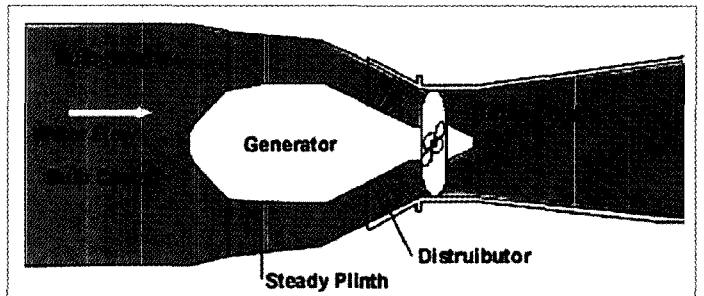


그림 5 Bulb형 수차 · 발전기 단면도

2). 운전성과

Rance 조력발전소는 복류식 발전이 가능하다. 복류식 발전은 양방향(조지→외해)의 조석을 이용한다.

- 조지충수 : Reverse Turbine(RT)으로 H<1.7m 될 때 발전을 중지한다. 이때 조지의 수위는 외해 만조위보다 낮기 때문에 수문 및 수차·발전기 도수로를 이용하여 충수하며, 양측 수위가 거의 같을 때 Accelerating Pumping으로 충수한다.

- 대기 : 단류식과 유사하며 발전 대기시간은 전력계통 운용에 따라 결정되며 발전시작 시각은 앞뒤로 약간 조정된다.

- 발전 : Direct Turbine(DT)으로 발전낙차가 1.2m 이하가 되면 발전을 중지한다. Cycle 끝에 수문과 Reverse Pumping(RP)으로 조지 배수를 실시하여 다음 Cycle에서 Reverse Turbine(RT)에 유리한 낙차를 얻도록 한다.

날개 끝에 붙어있고, 회전자의 바깥둘레는 고정자이다. 이 배열의 이점은 발전기 설계에서 공간이 넓고 냉각이 간단하다는 것이다.

- 회전자가 Runner 바깥 둘레에 설치되어 회전자 질량은 회전 관성력이 높아 운전에 안정성이 있다. 이 설계는 회전자의 측면과 수로사이의 Gap Sealing 문제가 있다. 이 Sealing은 하중을 받는 상태에서 Runner 날개의 만곡 뿐만 아니라 온도변형, 고정부와 이동부간 고속의 상대 속도를 수용해야 한다.

- 1984년까지 Runner 직경이 3.7m 이하의 소형이 제작되었으나, 직경 7.6m, 용량 20mw급 Prototype이 캐나다의 Fundy만 입구 Annapolis Royal 조력발전소에 처음으로 설치되었다.

- 발전기 계자권선은 열을 최대한으로 발산하도록 설계

3). 평가

- Rance 조력발전소는 수십 년 동안 프랑스 발전계통에 에너지를 공급해 왔다. 발전소 가동률과 신뢰도도 높아졌으며, 발전 방식은 발전과 양수 시간대를 적절히 조정하여 편익을 극대화 시키도록 결정되었다.

- 관광 및 위락단지로서 지역발전에 큰 몫을 하고 있고, 갑거를 통과하는 소형 유람선의 출입이 빈번해져 매년 16,000-18,000척에 달하며 발전소를 찾는 관광객의 숫자도 30~40만이나 되어 관광산업 발전에도 크게 기여하였다.

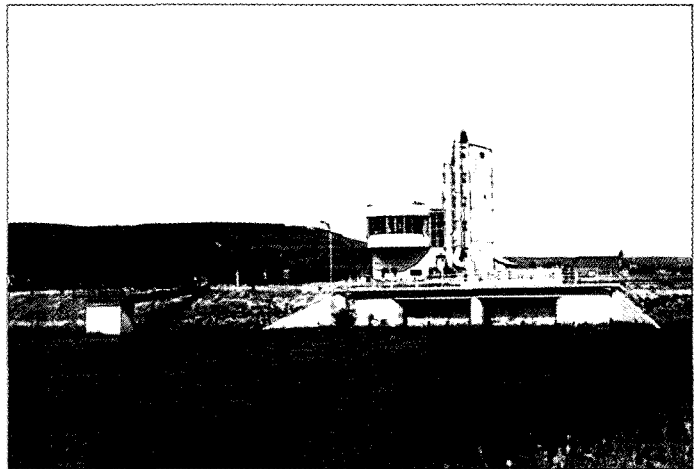


그림 6 캐나다 Annapolis 발전소의 전경

나. 캐나다 Annapolis 조력발전소

1). Rim 수차·발전기

Straflo 수차라는 제품명으로 판매되고 있으며, 캐나다 Annapolis 발전소의 전경과 설치된 Straflo 수차·발전기의 단면도를 <그림 6>과 <그림 7>에 나타내었다.

- 수차 Runner는 수평축 Kaplan Propeller형이다. 발전기 회전자는 Runner

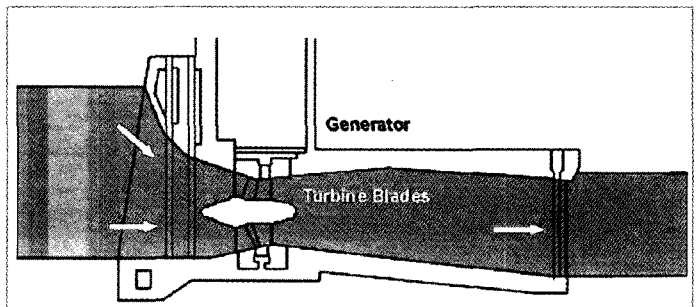


그림 7 Rim형 수차·발전기 단면도



되었으나, 권선 표면이 염분에 노출되어 Ground Fault가 생겼으며 이 문제는 Epoxy Coating으로 해결되었다.

### 다. 영국 Severn Barrage 조력발전소

#### 1). Tubular 수차 · 발전기

Severn Barrage에서 제시된 대표적인 Tubular 수차 · 발전기의 단면도를 <그림 8>에 나타내었다. 여기서는 발전기가 수로 밖에 위치하여 Kaplan Runner와 수로벽을 관통하는 긴 Shaft로 비스듬히 연결된다.

발전기 주변에 공간이 많고, Gearbox를 이용하여 Runner 속도를 증속시키면 발전기 크기를 작게 할 수 있어 비용을 상당히 절감할 수 있다. 600rpm 발전기는 크고 값도 비싸다. 10MW급까지 Tubular 수차 제작은 여러 곳에서 가능하며 가장 큰 것은 직경 8m 25MW급 5대이다. 여기에는 Spur Gear형 증속기가 설치되었으며, 긴 구동축 끝단과 Gearbox와 Flange 연결 상의 문제, 고출력시의 진동 문제 등이 발생되었다.

되었다.

수차 · 발전기는 Rance 조력발전소에서 사용되어 입증된 Bulb형으로 설치할 예정이다 (<그림 5> 참조).

#### 나. 울돌목 조류발전소

조류 유속이 가장 강한 전남 울돌목을 대상으로 조류에너지를 산정한 결과, 20m×20m 넓이의 Jacket 구조물 26기를 3열로 배치하면 9~13만kW가 개발 가능하며, 울돌목에 9만kW급 상용조류발전소를 건설할 경우의 연간 발전시간과 연간 발전량은 각각 약 6,900시간과 약 240GWh 정도이다. 이 시험조류발전소는 2007년에 완공할 계획이다(<그림 10> 및<그림 11> 참조).

## 4. 국내 조력 및 조류발전 현황 및 특징

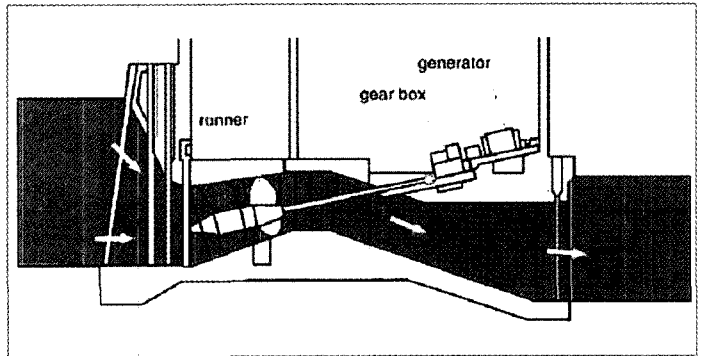


그림 8 Tubular형 수차 · 발전기 단면도

### 가. 시화조력발전소

전체 사업비 3,551억원을 들여서 2004년 11월에 착공하여 2009년 5월에 완공 목표로 경기도 시화호 방조제의 작은가리섬에 건설 중에 있으며, 설비용량은 254MW (25.4MW x 10기)로서 조력발전으로는 국내 최초이다(<그림 9> 참조).

하루에 두 번 밀물을 이용(창조식 발전)하여 연간 5억 5,200만kWh의 전력을 생산(인구 50만 도시 공급 규모)할 예정이고, 대체에너지 발전을 통하여 연간 86만2천 배럴의 유류 대체 및 15만 2천톤의 CO<sub>2</sub>저감효과 뿐만 아니라 해수유통에 의하여 시화호 수질도 개선할 수 있을 것으로 분석

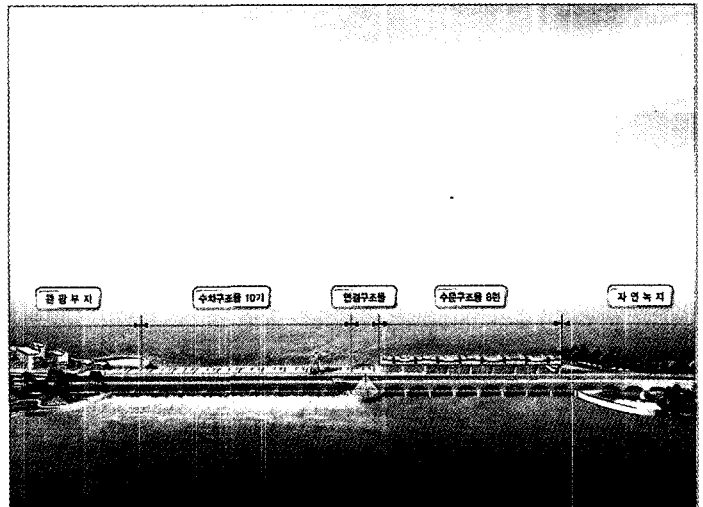


그림 9 시화조력발전소 구조도(전면)

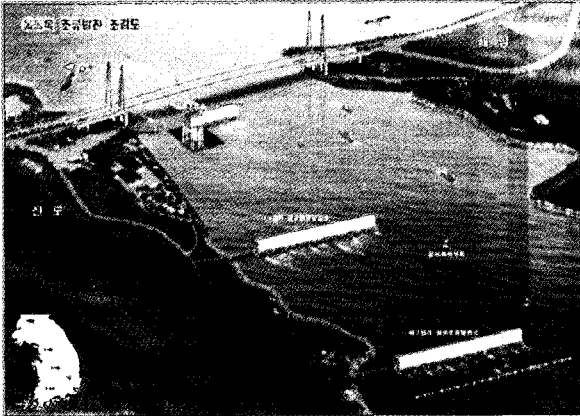


그림 10 전남 울돌목 조류발전소 조감도  
(시험시설, 2007년 완공, 1000kW)

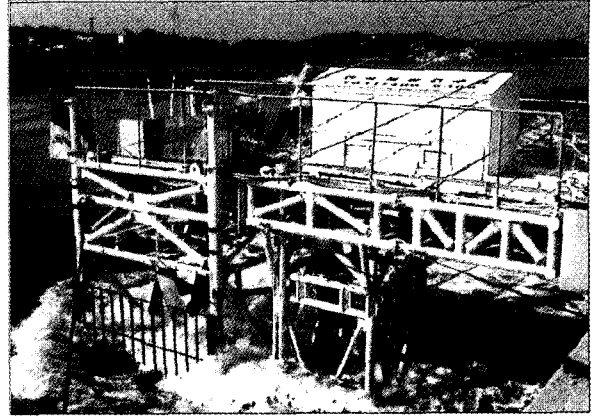


그림 11 전남 울돌목 조류발전 실증시설  
- 헬리컬터빈 또는 고틀로프터빈 장착

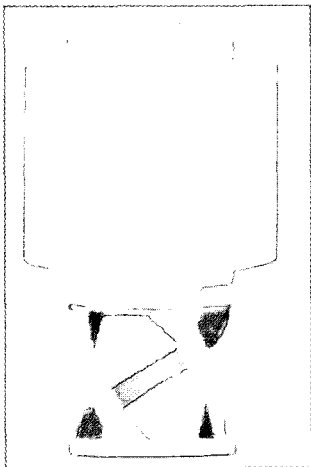


그림 12 헬리컬터빈의 모형

현재 미국의 알렉산더 고틀로프가 개발한 헬리컬 터빈을 이용할 계획이다. 다리우스형 수직축 풍력터빈을 변형하여 두 개의 날개가 나선형으로 올라간 터빈으로서 러너 블레이드를 나선형으로 만들어 조류의 방향이나 파도의 방향과 상관없이 항상 동일

회전성을 유지할 수 있다(〈그림 12〉 참조).

항공기를 뜨게 하는 양력을 이용, 날의 굽기가 다르게 설계되어 물이 1노트(1.85km/h = 0.5m/s)의 속도로 흐르더라도 스스로 움직이기 시작하고, 낙차가 0인

조수에서 에너지 전환효율이 35%이다(기존의 다리우스터빈 23%).

## 5. 결 론

우리나라는 끊임없이 재생산되는 무공해 에너지를 바다로부터 얻을 수 있는 좋은 자연환경을 갖고 있으므로 해양에너지(조력, 조류, 파력 등)를 이용한 에너지 개발에 더욱더 투자 및 연구를 할 필요가 있다.

### 참고문헌

- [1] 한국해양연구원, 1993, "조력발전 기술 현황 분석"
- [2] 한국해양연구원, 1997, "아산항 조력발전 타당성 검토"
- [3] 수자원교육원, 2005, "재생에너지 개발과정"
- [4] 수자원공사, 2002, "시화호 조력발전 건설사업 타당성조사 및 기본계획 보고서"