

한국 서해안의 조력개발 잠재성

염기대 | 한국해양연구원
해양에너지개발연구센터장

1. 요지

한국 서해안은 크고 작은 섬이 산재하고 굴곡이 심한 리아스식으로 이루어져 조력 발전을 위한 조력저수지 조성이 용이하고 강한 조석간만차가 발생하고 있어 조력 발전에 유리한 조건을 갖추고 있다. 1929년 조선총독부에 의한 인천해역 조력발전 가능성조사 이후 90년대 초반까지 서해 중부해역에 대한 조력발전 실용화 기술개발 및 조력개발 타당성검토 사업이 수차례 시행되었으나 실제 조력발전소 건설 단계까지 구체화되지는 못한 상태였다. 한편 94년 시화방조제 완공 이후 시화호내 수질이 급속히 악화됨에 따라 97년에는 당초의 담수호 조성계획을 일부 수정한 시화호 부분해수호 방안과 함께 조력발전소 설치가능성이 검토되었으나 경제성이 충분치 못한 것으로 나타났고 정부는 2000년 말 시화호 담수화 계획을 백지화하였다. 이에 따라 시화호의 조력발전소 건설타당성 조사 용역이 2002년 착수되었고 조력발전의 기술적, 경제적 타당성과 발전소 가동에 따른 수질개선 효과 등이 검토되고 있다.

한편 해양수산부는 국가해양개발 기본계획의 해양 에너지 개발계획에 따라 2000년부터 해양에너지 실용화기술 개발사업을 시작하였으며 이의 일환으로 강한 조류가 발생하는 전남 해남군 울돌목에서 2002년 3월부터 조류발전실험이 진행되고 있다. 이에 대

한 개요와 함께 이제까지 수행된 서해안 조력개발 관련 조사연구사업을 소개하였다.

2. 서론

에너지는 인간의 생활과 경제활동을 지탱하는 기반으로 1차 에너지원의 대부분은 석탄, 석유, 천연가스 등의 화석연료로서 세계 에너지 소비량의 약 40%를 석유가 담당하고 있다. 에너지 소비증가, 특히 매장량이 유한한 화석연료의 지속적인 소비증가는 필연적으로 수요공급상의 불균형을 심화시키게 되어 에너지가격의 지속적인 상승을 초래하고 궁극적으로는 에너지원이 고갈되는 사태에 직면하게 될 것이다. 선진국을 중심으로 세계 각국은 최근 에너지 소비절약 및 이용 효율화 방안을 구체화하기 위한 정책을 적극적으로 발굴, 시행하고 있고 이에 따른 가시적인 성과도 어느정도 나타나고 있으나 미래의 세계 에너지 수급 불균형 상황을 획기적으로 개선할 수 있을 정도의 효과를 기대하기는 어렵고, 석유의 경우 약 50년 이내에 고갈될 것으로 전망되고 있어 화석연료를 대체할 수 있는 새로운 에너지원의 개발이 시급하다. 또한 화석연료 사용에서 발생하는 CO₂는 지구온난화의 주원인으로 온실가스 총 배출량의 약 80%를 차지하고 있으며, 대기 중의 온실가스는 지표로부터 방출되는 적외선을 흡수

함으로써 대기온도를 상승시켜 사막화, 해수면 상승, 생태계 변화 등 전 지구적인 악영향을 초래, 인류의 미래를 위협하고 있다. 따라서 에너지 수급 불균형의 해소 뿐 아니라 지구 온난화 대응 측면에서도 청정 대체에너지 확보 문제는 가장 시급한 당면 과제이다.

조석, 조류, 파랑, 해양온도차 등 해양이 가지고 있는 에너지는 부존되어 있는 양이 막대하고 무공해 청정에너지이기 때문에 대체 에너지자원으로서의 가치가 아주 높다. 특히 조석에너지의 경우 조석현상이 강하게 발생하는 곳에서는 대규모 개발이 가능하고 비교적 단순한 장치를 이용해 동력 추출이 가능하기 때문에 아주 오래전부터 조석의 간만차를 이용하여 동력으로 사용해 보려는 시도가 있어왔다. 유럽에서는 이미 11세기 경에 조력방아를 사용한 예가 있으며 1966년에는 볼란서가 24만kW급 조력발전소를 완공하여 현재까지 운영하고 있고, 중국, 캐나다, 러시아 등 조력자원 보유 국가들도 시험발전소 규모의 조력발전소를 운영하고 있다. 조력발전의 실용화에 필요한 기술적 측면에서의 핵심기술은 대부분 확보된 상태로 현재는 개발경제성과 환경친화성을 제고하기 위한 연구가 진행되고 있다.

파랑에너지 또한 중요한 해양에너지 자원의 하나로 파력발전 실용화를 위한 연구가 북유럽, 일본 등 자원 보유국들을 중심으로 꾸준히 진행되고 있고 소규모의 실험발전 시설이 운영되고 있다. 그러나 파력발전의 경우 발전설비의 구조적 안전성, 발전효율 등 여러 가지 해결되어야 할 기술적 문제들이 숙제로 남아있기 때문에 실용화 단계까지는 앞으로 상당한 기간과 노력이 필요할 것이다. 해수의 표층과 저층간의 수온차를 이용하는 해양온도차발전은 수온차가 17내지 20도 이상이 되어야 하기 때문에 주로 열대해역을 대상으로 연구가 진행되고 있다. 해양온도차발전 역시 부존량이 막대함에도 불구하고 송전문제, 발전효율문제, 발전구조물의 안전성 문제 등으로 인하여 실용화 단계에 이르지 못하고 있다.

결국 실용화 가능성이 가장 높은 해양에너지는 조석에너지로, 우리나라 서해 중부역은 강한 조석현상이 발생하고 있어 세계적인 조력발전의 적지로 알려

져 있고, 1929년 조선총독부에 의해 인천해역에 대한 조력발전 가능성이 검토된 이래 여러 차례에 걸쳐 한국전력공사 주도하에 서해안 조력발전 타당성 조사사업이 시행되었다. 그러나 조력발전의 경제성 확보 문제 또한 청정 대체에너지 개발의 필요성에 대한 사회적인 인식 부족 등 여러가지 요인으로 인하여 현재까지도 실제적인 조력발전소 건설단계까지는 추진되지 못하고 있고, 한편으로는 70년대부터 활발하게 진행되고 있는 연안매립, 항만건설 등 서해안의 대규모 연안개발사업에 의해 조력발전 입지가 점차 상실되어가고 있는 실정이다.

최근 검토가 진행되고 있는 시화조력발전소 건설방안도 시화지구 개발사업의 당초 사업목표는 시화지구 12.7km의 방조제를 설치하고 방조제 내측의 조건대를 매립하고 담수호를 조성하는 것으로 추진되었으나 방조제 완공 이후 내측의 예기치 못했던 급격한 수질 악화로 인하여 담수호 조성계획을 포기하고 내측을 해수호로 유지하는 것으로 계획이 변경됨에 따라 시화해수호의 효율적인 활용방안의 하나로 제안된 것이다. 시화방조제에 조력발전소를 설치·운영할 경우 획기적인 수질개선 효과 및 환경친화적인 청정에너지 생산이 기대된다.

3. 조력발전 원리

해양에너지는 고갈될 염려가 전혀 없고, 일단 개발이 되면 태양계가 존속하는 한 이용이 가능하고 오염 문제가 없는 무공해 청정에너지라는 장점을 가지고 있다. 그러나 반면에 해양에너지는 그 에너지 밀도가 매우 낮기 때문에 현재 사용되고 있는 기존의 타 에너지원에 비해 상대적으로 큰 규모의 에너지 추출장치가 필요한 단점이 있다.

조력발전이란, 조석을 동력원으로 하여 해수면의 상승하강 현상을 이용, 전기를 생산하는 발전방식으로 강한 조석이 발생하는 큰 하구나 만에 조력 댐을 설치하여 조지(조력저수지)를 만들고 조력 댐을 조정하여 얻어지는 외해수위와 조지내의 수위차를 이용하

여 발전을 하게 된다. 이외에도 일정중량의 부체가 받는 부력을 이용하는 부체식, 조위의 상승하강에 따라 밀실에 공기를 압축시키는 압축공기식 등이 있으나 실용화 기술은 개발되지 못한 수준이다.

조력 댐은 수차발전기 구간, 수문구간, 통선문 및 방조제로 구성되며 조력 댐 내의 측의 수위차를 발전 낙차로 하여 수차발전기로부터 전력을 생산한다. 조력발전의 원리는 하천 수력발전과 아주 유사하나 발전낙차가 수력에 비해 작고 낙차가 시간에 따라 변한다. 그러나 조석현상이 주기적인 규칙성을 가지고 발생하고 또한 장기 예측이 가능하기 때문에 조력발전을 통해 얻어진 전력의 이용성은 타 대체에너지 전력에 비해 훨씬 유리한 장점을 가지고 있다

어떤 해역에 대해 조력발전소 건설을 계획할 때 가장 중요한 사항은 어떤 발전방식으로 얼마만한 규모의 발전소를 설치할 것인가 하는 문제일 것이다. 일반적으로 조력발전소의 규모는 일련의 최적화 과정을 거쳐서 결정되는데 여기서 고려되어야 할 항목으로

- 사용 가능 낙차 즉, 지속적으로 변화하는 외해수위와 발전소 가동에 따라 변화하는 조지 수위와의 차
- 조지의 수면적과 발전에 사용할 수 있는 총 해수 용적
- 수문의 용량
- 수차발전기의 용량

조력발전방식은 일반적으로 조석의 이용횟수를 따라 단류식 발전과 복류식 발전으로 나누고 단류식의 경우 이용방향에 따라 창조발전과 낙조발전으로 구분된다(그림 1). 또한 지형조건이 특수할 경우는 조지를 하나 더 조성해서 발전 지속시간을 연장할 수도 있다.

단류식 낙조발전은 조력 댐을 설치하여 조지를 조성, 창조시에 수문을 개방하여 조지내에 해수를 만조 수위까지 채운 후 수문을 닫고 대기하다가 낙조 때 조지와 외해조위간의 수위차를 이용하여 발전하는 방식이다. 이와는 반대로 낙조시에 수문을 개방하여 조지 수위를 간조수위까지 낮춘 후 창조시에 발전을 하는

형태가 창조식 발전방식이다. 어느 경우이든 발전을 함에 있어서 한 방향의 흐름만을 이용하므로 단류식이라 한다. 운전방식은 발전 대기 충수 대기의 사이클을 계속 반복하므로 발전출력의 단속이 불가피하다. 그러나 발전방식이 가장 간단하고 발전설비의 가격도 저렴하여 가장 실용적인 조력발전방식이다.

복류식 발전방식은 창조 및 낙조 모두 발전이 가능하며 따라서 단류식에 비해 발전시간이 연장될 수 있다. 그러나 이 경우에도 역시 조지와 외해와의 수위차가 발전가능낙차에 이를 때까지 대기해야 하기 때문에 발전은 단속적이다. 또한 수차발전기도 2방향 발전이 가능해야 하기 때문에 단류식 수차발전기보다 구조가 복잡해진다. 일반적으로 이 발전방식은 조차가 아주 크게 발생하는 지역에서 이용하면 단류식보다 유리한 것으로 알려져 있으나 우리나라 서해안의 경

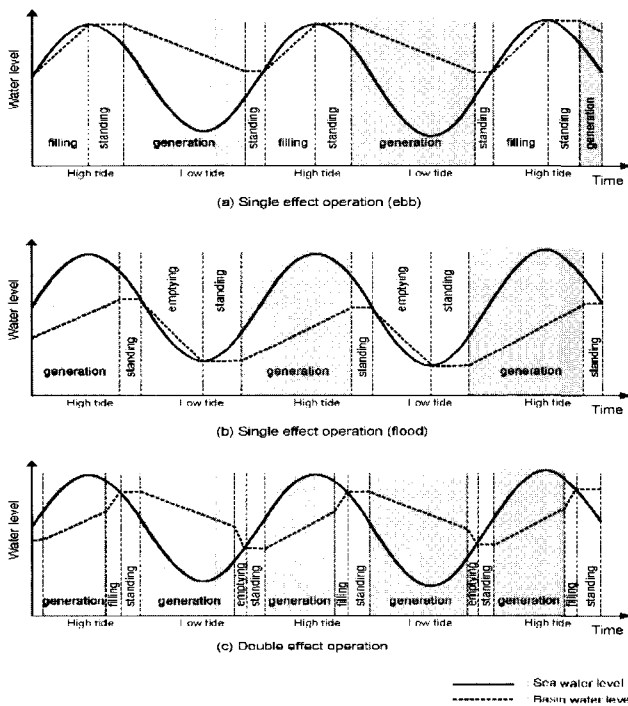


그림 1. 발전방식 개념도

우 단류식이 유리한 것으로 검토되었다.

4. 국내 타당성조사 사례

조력발전은 발전량 측면에서는 조석간만의 차가 크고 조성되는 조지면적이 넓을수록 유리하고, 건설비 측면에서는 설치되는 댐의 길이가 짧을수록 유리하다. 우리나라 서해안은 굴곡이 심한 리아스식 해안으로 크고 작은 만이 발달해 있고 조차가 커서 세계적인 조력발전 적지이며, 남해안의 울돌목 및 주변해역은 강한 조류로 인하여 조류발전의 적지이다.

우리나라 서해안 중부, 경기만 해역은 큰 조차 및 잘 발달된 해만으로 인해 천혜의 조력에너지 자원 보고로 알려져 있다. 서해안에서의 조력발전에 대한 구

상은 1920년대부터 시작된 것으로 추정되며 1929년 조선총독부 체신국에서 시행한 '인천만 조력발전 방안에 대한 조사' 이후 여러 차례에 걸쳐 조사사업이 수행되었다. 특히 1970년대 초 석유파동으로 인한 대체에너지 개발 및 탈석유전원개발정책의 일환으로 1974년부터 한국해양연구소, 한국전력공사 등 관련 기관에 의해 수차에 걸쳐 본격적인 타당성 검토 조사사업이 실시되었다.

1978년에는 한국전력의 위탁으로 한국해양연구소와 캐나다 Shawinigan사 공동으로 실시된 '서해안 조력 부존자원조사'를 통하여 서해안 중부 일대에 선정된 조력자원개발 입지 10개 지점에 대해 약 650만 kW의 조력부존자원량을 확인하였다. 이 중 충남 서산군 소재 가로림만의 경우, 1981년 해양연구소와 블란서 Sogreah가 수행한 '가로림만 조력발전 타당성

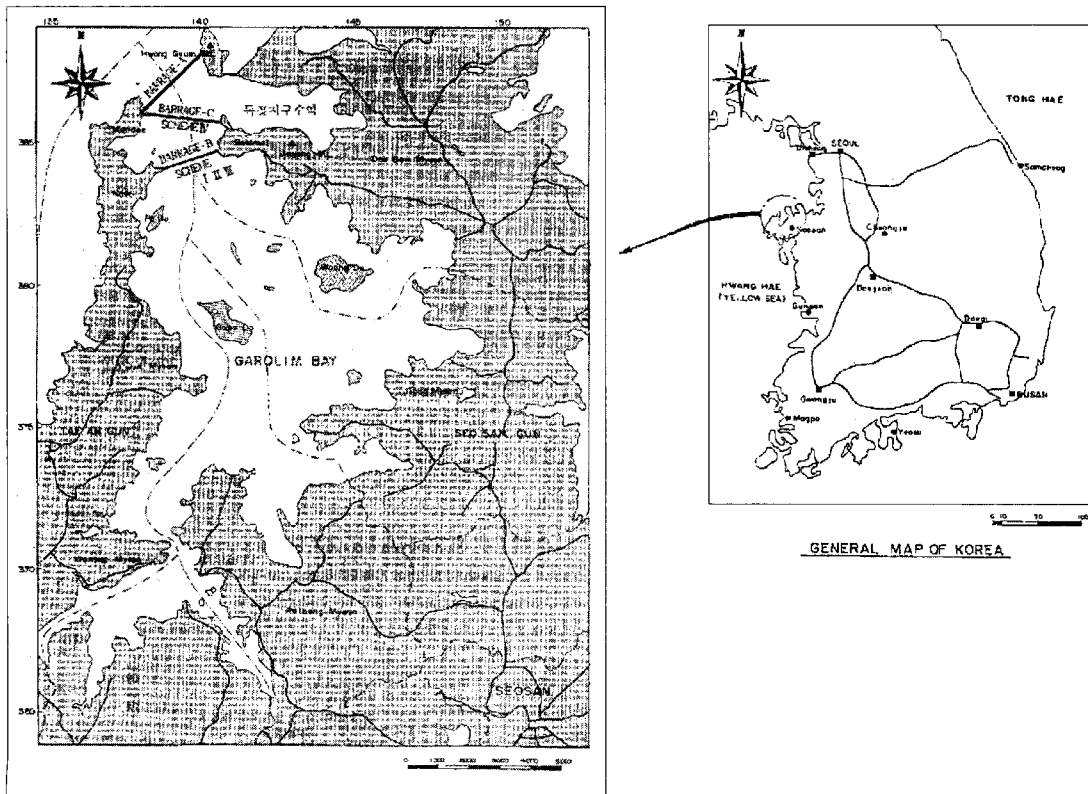


그림 2. 가로림만 위치도

조사(한전위탁)를 통하여 기술적 및 경제적 개발타당성이 입증되었으나, 제5차 경제사회개발 5개년계획 투자우선순위 조정시 조력발전은 1987년 이후에 착공기로 결정된 바 있다. 그러나, 1986년 한전 위탁으로 해양연구소와 영국 EPD 공동으로 실시한 '가로림 조력발전 후속조사 및 우수영 조류발전 예비타당성조사'에서는 당시 유가의 하락 추세 및 건설공사비의 상승요인에 의하여 조력발전의 개발경제성이 미흡한 것으로 평가되어 개발이 다시 보류되었다.

그 후 1991년 한전은 해양연구소와 중국의 국가과학기술위원회에 그 동안의 여건변동을 고려한 '가로림 조력개발 타당성 재조사'를 위탁 실시하였으며 93년 완료된 조사 결과, 가로림 조력개발(시설용량 48만

kW)은 발전 단일목적으로 개발할 경우는 개발경제성이 미흡(B/C = 0.84)하고, 전력생산 외에 만내 수산양식 증대효과, 관광효과, 교통효과 등 부수적 편익을 고려할 경우에는 개발경제성이 있는 것으로 나타났다.

1997년 한국해양연구소는 서해 중부 인천 신공항 북측해역, 아산만, 천수만과 북한의 해주만과 웅진만을 대상으로 조력발전 가능성을 개략 검토하였다(그림 3, 표 1). 검토 후보지중 인천 신공항 북측해역의 경우 공항부지 조성 시 시행된 영종도 부근 산재된 섬들을 연결하는 매립공사의 결과로 조력저수지 조성 여건이 크게 향상되어 장래 유력한 조력개발 후보지의 하나로 제시되었다.

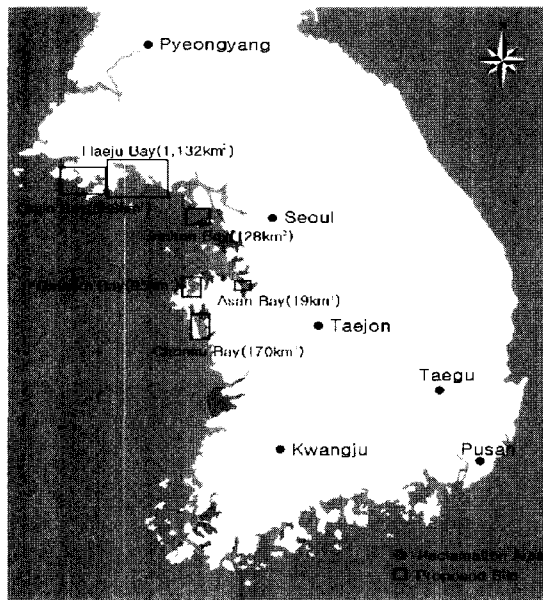


그림 3. 조력발전 개발 입지

5. 시화호 조력발전

시화호 방조제 공사가 완료된 1994년 1월 이후 해수유통이 차단됨에 따라 시화호내의 물은 거의 정체화되면서 자정능력이 크게 감소되었다. 또한 안산시 등 인근 지역의 주거지와 공단 입주업체 등 오염발생원이 시화지구 개발계획수립 당시에 예측했던 규모보다 훨씬 증가됨에 따라 유역 내 하수처리장 등 환경기초시설이 턱없이 부족하게 되었고 처리되지 않은 많은 양의 수질오염물질이 시화호 내로 유입되면서 시화호의 수질은 급속하게 악화되었다.

이러한 시화호 수질의 악화는 지역주민과 시민단체의 반발과 같은 심각한 환경문제로 대두되었으며, 급기야는 국가적 사회적인 관심사로 떠오르게 됨에 따라 정부 및 사업자가 시화호 수질개선을 위한 장단기 대책을 서두르게 되었다. 시화호 수질개선대책의 일환으

표 1. Computed optimal tidal energy generation systems at the proposed sites.

Factor \ Site	Inchon	Chonsu	Asan		Haeju	Ongjin
Mean Spring Tidal Range(m)	7.2	5.16	8.34		5.79	4.15
Basin Area(km ²)	128	170	19		1,132	358
Generating Type	Ebb	Ebb	Ebb	Flood	Ebb	Ebb
Installed Capacity(MW)	720	600	160	120	4,000	1,000
Annual Energy Output(GWh)	1,396	966	320	179	6,360	894

로 한국해양연구소는 1996년 11월부터 1997년 5월까지 한국수자원공사의 요청에 따라 시화호의 하류·중류·상류를 각각 해수호·담수호·인공습지로 3분화할 경우(그림 4), 해수호를 대상으로 조력발전소를 설치할 경우에 대한 기술적 타당성 및 발전경제성을 개략 검토하였으며 검토결과, 시설용량 16만kW의 창조식 조력발전소 설치가 가능하고 수질개선 효과도 기대되지만 발전경제성은 충분치 못한 것으로 나타났다(B/C=0.86).

한편으로 시화호 수질개선을 위한 여러 가지 장단기대책을 수립해서 시행한다할지라도 과연 시화호를 담수화하여 용수자원을 당초 계획대로 확보할 수 있느냐 하는 문제는 계속 의문시 되어 왔고 결국 2000년 12월 30일 정부는 공식적으로 시화호 담수화 계획을 포기하고 해수호로 유지하는 방침을 결정하게 되었다.

시화호의 수질은 당초 배수용으로 설치되었던 방조제 남단의 배수갑문을 이용하여 외해수를 지속적으로 유출입 시키고 또한 각종 환경저감시설을 운영함으로써 점차 개선되고는 있으나, 외해와의 해수유통 측면에서 배수갑문의 유통용량 및 설치위치 상의 한계 때문에, 근본적인 수질개선 효과를 얻기 위해서는 추가로 대규모의 해수유통시설이 필수적인 것으로 판명되었다. 이에 따라서 해수유통 촉진방안의 하나로 조력발전소 설치방안이 다시 한번 검토대상으로 제시되었고 한국수자원공사는 2002년 3월 시화호 조력발전 타당성 조사 및 기본계획 수립 용역을 착수하였다. 이 용역은 일련의 현장조사 및 해수유통, 파랑변형, 퇴적물 이동, 수질변화 등에 대한 수치실험과 발전소 개념설계, 공사비 산정 등이 포함된 포괄적 사업으로 완료단계에 와 있다. 현재까지의 결과를 보면 시설용량 약 25만kW의 창조식 발전방식이 적절하고 발전 경제성 및 수질개선 효과도 충분한 것으로 나타나고 있다.

시화호 조력발전소 건설은 담수호로서의 기능을 상실한 시화 해수호를 다양하게 활용할 수 있는 방안으로서 수질개선을 도모하고, 기후변화협약에 적극 대처할 수 있는 무공해 전력을 공급하며, 적절한 발전방식을 적용할 경우 현재 시행중 또는 시행예정인 주변 간사지 개발계획과 서로 상충됨이 없이 개발이 가능

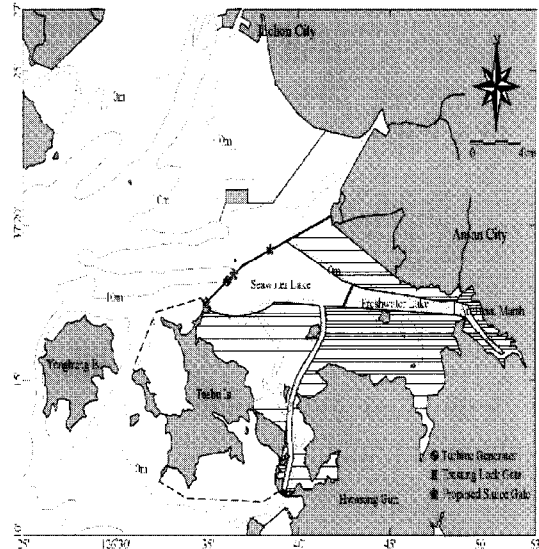


그림 4. 시화호 삼분화 계획도

하다. 또한 시화호 내의 개선된 수질과 조력발전소 가동에 따른 조석간만 효과 및 방조제에 의한 황천시의 파랑 차폐효과 등을 이용하여 대규모의 수도권 해양관광단지 개발이 가능하므로 국민의 여가선용 및 지역경제의 활성화를 유도할 수 있는 시화호 다목적개발에 부합되는 안이 될 수 있을 것이다.

6. 조류 에너지

조수 간만차를 이용하는 조력발전과는 달리 강한 해수의 흐름 즉, 강한 조류가 발생하는 곳에서는 해수의 운동 에너지로부터 직접 동력을 추출할 수 있다. 그러나 전 세계적으로 해수의 흐름으로부터 전기를 생산할 수 있을 정도의 강한 흐름이 발생하는 해역은 많지 않고, 또 강한 흐름이 발생하더라도 지형상 발전 구조물을 용이하게 설치할 수 있고 송전이 용이한 조건을 갖춘 해역은 더욱더 찾아보기 어렵다.

우리나라의 경우 전남 해남군과 진도 사이의 울돌목을 비롯해서 진도 주변의 맹골수도과 장죽수도, 경남 늑도 및 강화도 부근 해역에서 조류발전이 가능한 크기의 강한 조류가 발생하고 있다. 1957년 임진왜란

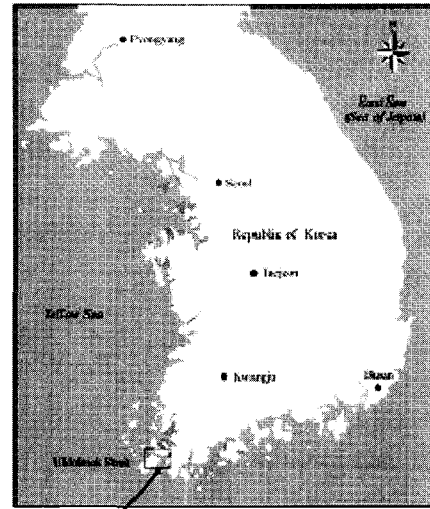
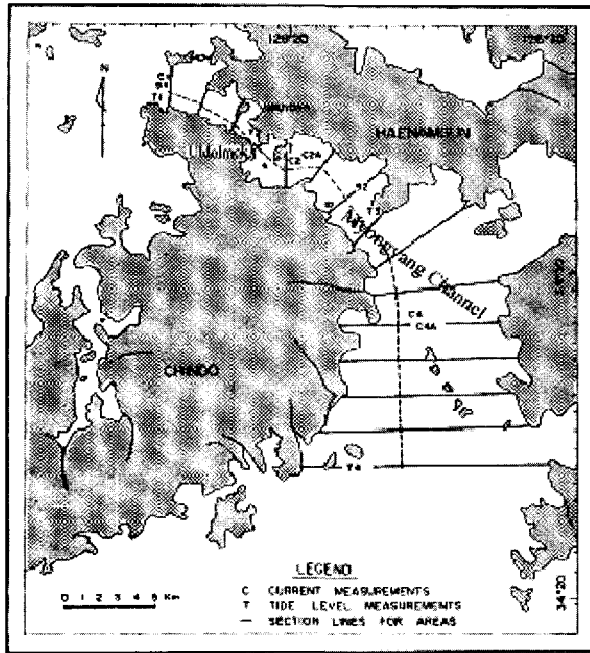


그림 5. 울돌목 위치도

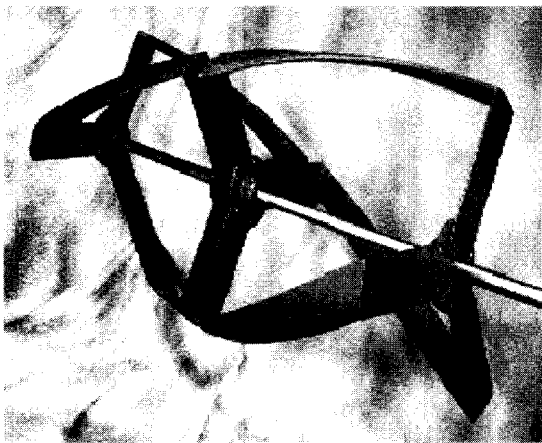


그림 6. 헬리컬터빈

이후 2002년 3월 한국해양연구원은 미국 Northeastern 대학의 Gorlov박사가 고안한 40kW급 Helical 수차 2기를 울돌목에 설치하여 수차의 성능 개선 및 내구성 향상을 위한 현장실험을 진행하고 있다(그림 6). 이 수차는 기존의 조류발전용 수차에 비해 발전효율이 약 50% 이상 높게 나타나고 있고 구조가 비교적 간단하기 때문에 현재 진행 중인 현장실험을 통해 실용화 기술이 확보되면 조류발전을 통한 전력생산이 현실화 될 것이다. 이 사업은 해양수산부가 2000년 수립한 국가 해양개발 기본계획의 세부 실천계획인 해양에너지 개발계획의 일환으로 추진되고 있다.

당시 이순신장군의 3대 승첩지의 하나인 울돌목은 최협수로 폭이 약 310m로, 순간 최대 유속이 초당 6m를 넘는 강한 조류가 발생하는 해역으로 한국전력공사는 1986년 이 해역에 대해 단위기 용량 1,500kW급 프로펠러형 수차발전기를 이용한 조류발전 가능성을 약식 검토한 바 있다(그림 5)

7. 결론

전기는 현대 인간사회에서 가장 핵심적인 역할을 하는 문명의 이기이다. 그러나 한편 전기를 생산하기 위해서는 화석연료 또는 원자력을 이용하여 발전을 하게 되는데 이로 인한 심각한 환경 피해는 점차 인간의

생활을 근본적으로 위협하는 지경에 다다르고 있다.

풍력, 조력, 태양열 등 개발 가능한 무공해 대체 에너지는 기존의 화석연료 에너지에 비해 에너지 밀도가 낮기 때문에 단순히 발전 경제성만을 고려할 경우 불리할 수밖에 없다. 그러나 오염물질 배출로 인한 대기오염 및 지구온난화, 자원의 고갈, 사용후 핵연료 처리 등 기존 발전방식에서 야기되는 문제점을 종합적으로 고려한다면 무공해 대체 에너지 개발은 전 지구가 당면한 가장 시급한 과제일 것이다.

우리나라 서해역은 세계적인 조력자원 개발 적지이며, 특히 시화호는 이미 방조제가 설치되어 있기 때문

에 발전 경제성 확보에 유리한 여건을 갖추고 있다. 또한 시화호에 조력발전소가 설치되어 운영되면 시화호 수질문제도 자동해결이 가능할 것이므로 시화호 조력발전 계획은 계속 추진되어야 할 것이다.

시화호에 조력발전소가 설치·가동되면 시화호는 수위가 변화하는 반 폐쇄성 해역으로 변하게 되고 시화호 외측에도 상당한 해양 환경의 변화가 예상된다. 따라서 조력발전소 건설 전후의 정밀 환경 모니터링을 통해 해양환경 변화 추이를 파악함으로써 발전소 건설중 또는 가동시에 발생할 수 있는 제반 사항에 적절히 대응할 수 있을 것이다.

참고/문헌

KORDI, 1978. Tidal power potentials on the west coast of Korea.
 KEPCO, 1981. Feasibility study on Garolim tidal power plant.
 KORDI, 1986. Korea tidal power study I,II
 Baker A.C. 1991. Tidal power, Peter Peregrinus Ltd, London.
 KEPCO, 1993. Feasibility study on Garolim tidal power dev.
 KOWACO, 1997. Pre-feasibility study on Siwha tidal power project
 KORDI, 1997. Study on the optimization of tidal power generation.
 KORDI, 2000. Utilization technique for ocean energy