

파랑에너지 실용화를 위한 고찰

김 현 주 / 한국기계연구원 해양기술연구부 해역제어기술그룹

강 윤 구 / 일본운수성 항만기술연구소 수공부 내파연구실

1. 서론

최근 화석에너지의 고갈에 따른 대체에너지 개발이 강조되고 있으며, 그 소모에 따른 CO₂의 발생 및 지구온난화 문제 등으로 청정에너지의 개발이 요망되고 있다. 해양에는 파랑, 조석, 해류, 온도차 등의 청정한 자연에너지가 무한정으로 부존하고 있다. 이를 사용하기 위한 해양에너지 이용기술이 다각적으로 연구되고 있고, 다양한 이용시스템이 제시되어 있다.

우리나라에서도 10여년 전부터 파력발전, 조력발전, 온도차 발전, 풍력발전 등의 해양에너지 이용에 대한 연구가 진행되어 오고 있다.

그런 대부분의 해양에너지 이용기술은 현단계에서 경제성을 갖지 못하는 것으로 평가되어 실용화된 예는 100W급 파력발전 항로표지 등과 같은 소수에 불과하다. 이는 현재의 경제성 평가방법이 시설비와 관리비 투자에 대한 출력 생산성만을 고려하고 화석에너지에 의한 환경오염 피해보상 및 자연환경에 대한 손실은 고려하지 못하고 있기 때문에 해양에너지가 경제성이 없는 것으로 받아들여져 미래 수요기술로 평가되어 연구개발되고 있는 실정이다.

한편 상용전원의 공급을 위한 송전시설비가 많이 드는 낙도나 기왕 계획된 시설에 적은 투자로 에너지 변환장치를 부

가할 수 있는 경우 해양에너지 이용시스템의 실현 가능성은 낮지 않다는 것이 지적되고 있다. 따라서, 해양에너지 이용에 대한 문제점 및 개발방향에 대한 다각적인 검토가 필요하며, 이를 통한 체계인 연구의 필요성이 제기되고 있다.

본 연구에서는 연안자원의 종합 이용 및 개발을 목표로 한 파랑에너지 고도이용기술 정립을 위한 기초적 검토를 수행하고, 파랑에너지 고도이용방안에 대한 기초적 검토를 수행하고자 하였다. 이를 위해 파랑에너지 이용기술의 현황 및 문제점을 검토한 후 적정 변환시스템의 선정 및 개발을 위한 한국 연안의 해역별 파랑에너지 가용량 분포 및 변동

특성을 정리하고, 파랑에너지 분포특성에 기초한 에너지 변환장치 및 이용시스템에 대해 고찰하고자 한다. 이로부터, 우리나라 연안의 파랑에너지 출현특성에 적합한 파랑에너지 이용시스템 및 해역환경개선기술 개발방향에 대해 고찰하고자 한다.

2. 파랑에너지 이용기술의 현황 및 문제점

2.1. 파랑에너지 취득 및 이용시스템

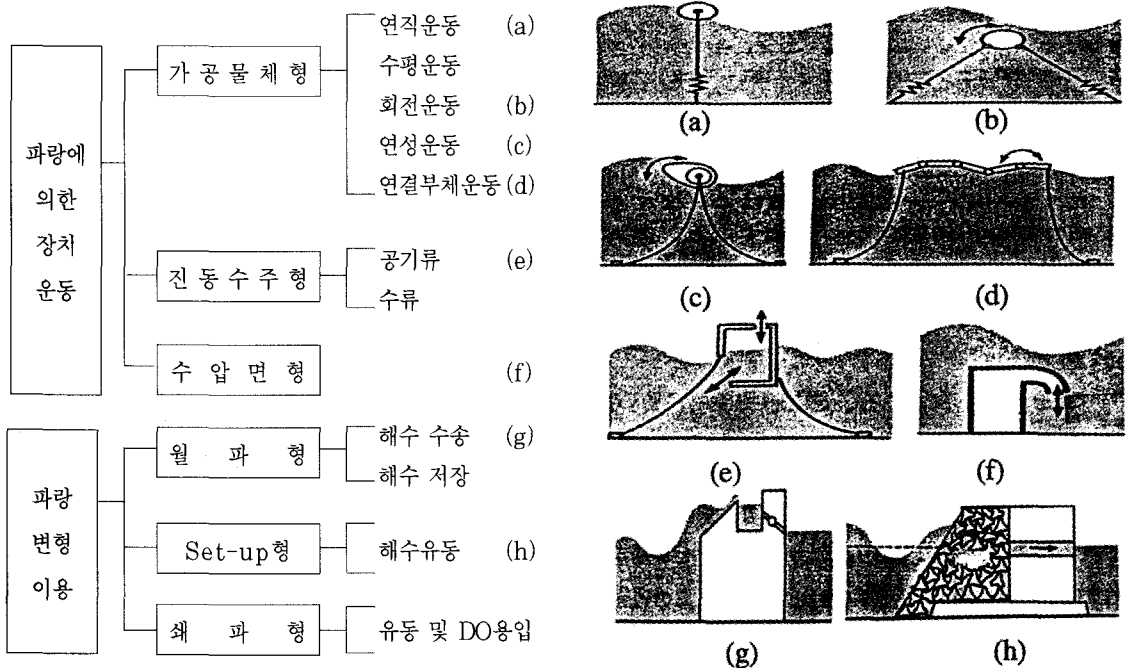
파랑에너지의 이용은 파랑이

가진 에너지를 인류가 생존 및 생활하기 위한 에너지원으로서 사용하는 것을 의미한다. 파랑 에너지는 발전, 해수교환 촉진 및 DO공급에 의한 해역환경개선, 육상수조식 양식산업 및 제염을 위한 용수공급 등에 이용될 수 있으며, 점차 다양한 활용처가 등장할 것으로 생각된다. 이를 위해서는 다양한 에너지 취득(변환)-저장-공급-이용시스템이 필요하며, 실용화를 위해서는 각 단계의 장치 효율을 높이는 것과 변환단계를 줄이는 노력이 필요하다.

파랑에너지는 1차변환(역학적 에너지)장치는 <그림1>파

같이 분류할 수 있다. 1차변환장치는 '파랑에 의한 장치의 운동을 이용하는 방법'과 '파랑변형에 따른 수리특성을 이용하는 방법'으로 대별할 수 있다.

전자는 파랑에 의해 동요하는 가동물체의 운동(연직, 수평, 회전, 연성, 연결부체)에너지, 구조물 내부의 수주운동에 의한 유체운동에너지, 수압면의 운동에너지 등을 이용하는 방법이고, 후자는 해안으로 진행되는 파랑의 변형특성에 의해 급경사 구조물이나 지형을 넘어가는 월파에 의한 해수수송이나 저장하여

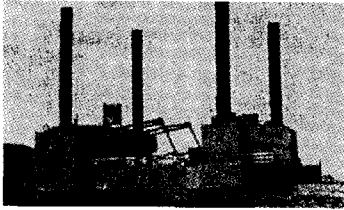


<그림 1> 파랑에너지 1차변환장치의 분류 및 예

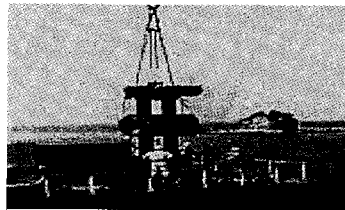
이용하는 월파형, 파랑제어구조물에 의한 파랑에너지 감쇠 또는 쇄파에 따른 평균수위 상승에 의한 위치에너지로부터 해수유동을 유발시키는

Set-up형, 자연해빈 또는 구조물과는 상호작용에 의한 쇄파결과 용입되는 DO를 통해 해역환경을 개선시키는 쇄파형 등이 있다.

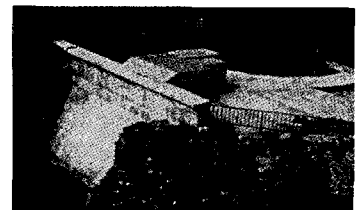
종래 다양한 파랑에너지 취득이용 시스템이 개발되어 있으며, 대표적인 예를 파력발전 시스템을 <그림 2>에 나타내었다. 그림에서 (a)에서 (f)까지



(a)부체형 파력발전장치 “海陽”



(b)진자식 파력발전장치



(c)연안고정식 파력발전장치



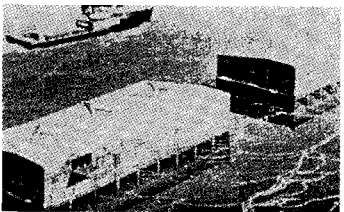
(d)정압탱크식 파력발전장치



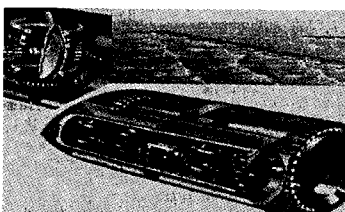
(e)파력발전 방파제



(f)Tapchan



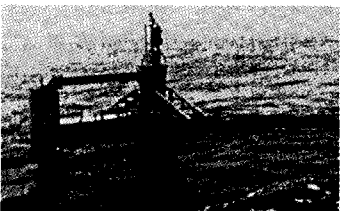
(g)NEL OWC



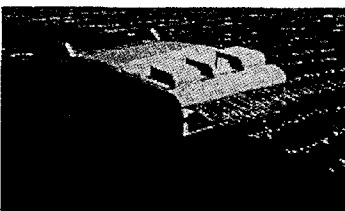
(h)Salter duck



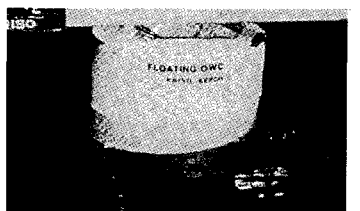
(i)파력발전장치 “海明”



(j)BBDB



(k)다목적 파력발전장치 Mighty whale



(l)원주형 파력발전장치

<그림 2> 파력발전시스템의 예

는 고정식 파력발전시스템이며, (g)에서 (l)까지는 부유식 파력발전시스템이다.

종래 개발된 파랑에너지 이용시스템은 주로 100W로부터 2MW까지의 다양한 출력의 발전시스템이며, 대부분이 실내 실험을 통해 개발된 후 현장실험을 통해 검증을 거쳤거나 계획하고 있는 상태로 실용화된 경우는 항로표지용 파력발전장치 등에 국한되고 있다. 따라서 파랑에너지의 실용화에 대한 문제점을 조망하고 대책을 정리함으로써 고도 이용을 위한 기초를 제공하고자 한다.

2.2. 파랑에너지의 이용상 문제점

파랑에너지를 취득하고 이용하기 위한 다양한 원리, 장치 및 시설들이 연구되어 왔다. 이들은 이용형태에 따라 효율이 인정되어 실용화되기도 하였고, 경제성이 나아지기를 기다리는 결과들도 있다. 그러나, 에너지자원의 한계성과 지구환경보전의 관점에서 실용화가 강조되고 있으며, 실용화를 위해서는 현 단계에서의 문제점을 조망하고 해결하는 노력이 필요하다. 이를 요약하면 다음과 같다.

1) 가용 에너지량의 규모에 따른 제약

파랑에너지 이용시스템은 실용화된 100W급 파력발전부이로부터 수 MW급 발전시스템이 제안되어 있고, 우리나라에서는 60kw급 파력발전장치를 개발하고 있다.

이는 온도차 발전장치(수 MW에서 수천MW급), 조석발전장치(수십MW에서 수천 MW급), 해류발전장치(수십 MW에서 수천MW급) 및 조류발전장치(수MW에서 수백 MW급)에 비하여 낮고, 넓은 범위에 분포해 있다. 따라서, 수요 규모가 큰 경우에는 이들 시스템의 복수배열이 필요하며, 이 경우 건설비용 및 경제성을 고려한 규모 등의 제약이 따르게 된다.

2) 에너지 취득량의 변동성

자연 에너지는 대부분 시간적, 장소적 변동이 크기 때문에 에너지 취득시스템의 가동률 및 에너지 이용시스템의 효율화를 생각하지 않으면 안된다. 조석이나 조류의 경우 반일 또는 1일 주기로 변동하며, 해류나 온도차는 비교적 변화가 적지만 표층수온은 계절에 따라 변화하는 특징을 보인다.

그러나 파랑은 시시각각 변화하여 시간단위로 부터 주단

위, 월단위, 계절단위로 변동하는 특징을 지닌다. 따라서, 변동을 허용하는 시스템을 강구해야 하며, 그에 따른 시스템의 복잡화도 회피할 수 있도록 되어야 한다.

3) 취득에너지의 이용거리의 거리

파랑에너지를 이용할 만한 곳은 개방성 연안역이나 에너지가 집중되는 곳 등이 고려될 수 있다. 해안 고정식의 경우 육지내 이용거리의 거리가 멀지 않을 수도 있으나, 국지적으로 파랑이 거친 곳은 거주지나 산업용지로 사용되지 않으므로 이송시설을 위한 비용이 증대될 수 있다.

해안과 떨어진 경우 이안형 고정식 또는 부유식을 생각할 수 있고, 이안형 고정식의 경우 1/100경사 해빈에서 수십 5-15m까지의 수평거리는 0.5-1.5km, 이안형 부유식의 경우 1/100경사 해빈에서 수십 15m이상까지의 수평거리는 1.5km이상이 된다. 이러한 이격거리는 에너지 이용비용을 결정하는 요소의 하나이므로 현재의 경제성 평가관점에서는 기존 에너지에 비해 경제성을 잃게하는 요소가 될 수도 있다.

4) 제한적인 이용 형태

대부분의 해양에너지 이용 방안은 화석에너지에 대한 대체에너지로서 전력을 공급하는 것이었다. 그러나, 전술한 바와 같은 문제를 고려하면 이용적지, 이용형태에 부합되는 에너지 변환 및 이용시스템이 중요하다. 해수정화나 양식장 해수공급을 위한 파력발전 및 펌프 구동이나, 외딴 양식장이나 낙도에 상용 전원을 공급하는 것은 에너지 이용효율을 저하시킬 뿐 아니라 경제성이 떨어지게 된다. 따라서 다양한 이용형태가 필요하다.

3. 우리나라 연안에 적합한 파랑에너지 기술

우리나라 연안에 적합한 파랑에너지 이용기술의 정립을 위해서는 전술한 고도이용 방안을 기초로 (1)파랑에너지의 가용량 및 출현특성을 평가하고, (2)파랑에너지 가용량에 적합한 고효율 에너지 변환시스템 및 (3)파랑에너지 실용화를 위한 저장 및 이용기술이 정립되어야 한다.

3.1. 우리나라 연안의 파랑에너지 가용량 평가

(1) 심해파 에너지 부존량

심해파의 에너지 부존량은 British Maritime Technology의 Global Wave Statistics 자료와 해양수산부의 장기파랑 수치해석 추정치를 사용하여 산정하였다.

Global Wave Statistics 자료는 동해, 남해, 서해에 대한 전년 및 계절별 평균 유의파고 및 주기로서 정리되어 있으며, 이를 이용한 해역별 파랑에너지 이용가능량과 계절적 변동 특성 해석결과 동해에는 평균 11kW/m , 남해에는 16kW/m 그리고 서해에는 10kW/m 의 wave power가 부존하고 있는 것으로 나타났다. 이는 남해안의 파랑자료에 남해와 일본 동해의 태평양의 파랑자료도 포함되어 있기 때문이며, 과대평가하는 면이 있는 것으로 생각된다.

한편 연안으로 입사해오는 연근해 심해파 에너지 부존량을 해양수산부의 장기파랑해석 자료(1996)를 이용하여 평가하였다. 동해, 남해, 서해를 각 10개 해역으로 구분하여 평균 에너지 분포량을 산정하여 <그림 3>에 정리해 놓았다. 그림에 나타난 것처럼 동해에는 $1.79\text{--}6.96\text{kW/m}$, 남해에는 $1.54\text{--}5.25\text{kW/m}$, 서해에는 $1.00\text{--}4.13\text{kW/m}$ 의 wave power가 분포하고 있으며, 평

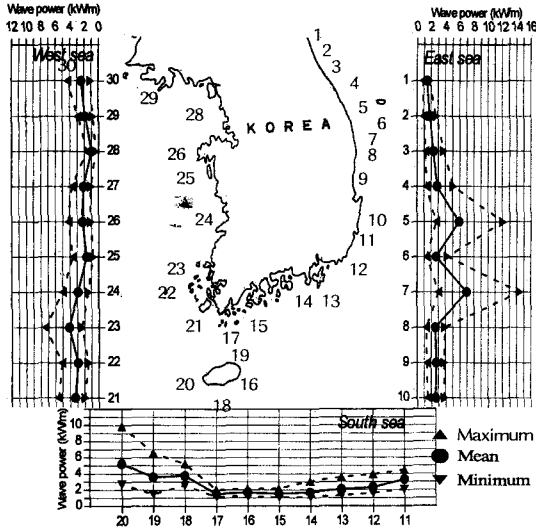
균 부존량을 격자점을 중심으로 한 구간별 거리에 대한 분포량으로 산정하여 집계한 결과 한국 연안의 파랑에너지 부존량은 평균 4.7GW (제주 포함시 5.6GW)에 달하는 것으로 나타났다. 이는 우리나라 평균 전력사용량 21GW (1996년 기준)의 22%(제주 포함시 26%)에 달하는 량이다.

한편 대표적인 해역의 월별 평균 wave power 분포량을 <그림 4>에 나타내었으며, 계절적 변화가 심함을 알 수 있다. 동해 및 서해는 동절기에, 남해는 하절기에 파랑에너지가 집중하고 있는 것을 알 수 있다.

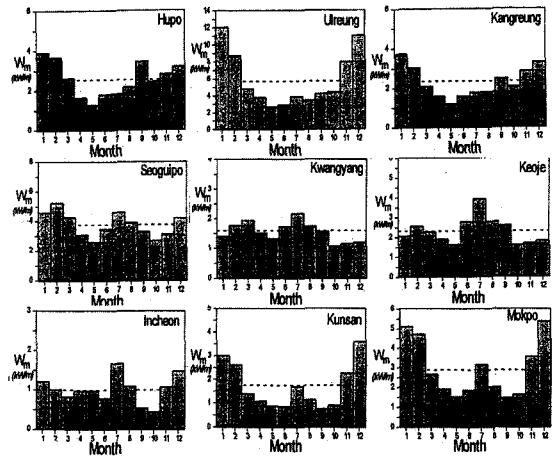
(2) 친해파 에너지 부존량

연안 파랑관측소로 부터 측정된 관측자료를 대상으로 친해파 에너지 부존량을 대표파의 천수변형을 고려하여 산정하였다. 친해파 에너지 부존량 평가는 '74~'82의 경우 친해파 영역에서 관측된 결과이며, '90~'94의 자료에서는 관측소에 따라 심해파에 해당하는 경우도 있었다. 산정결과를 <그림 5>에 나타내었으며, 동해, 남해, 서해에 각각 평균 $1\text{--}3\text{kW/m}$, $0.5\text{--}4\text{kW/m}$, $0.5\text{--}2\text{kW/m}$ 의 wave power가 부존하고 있는 것으로 나타났다. 계절적 변동특성은

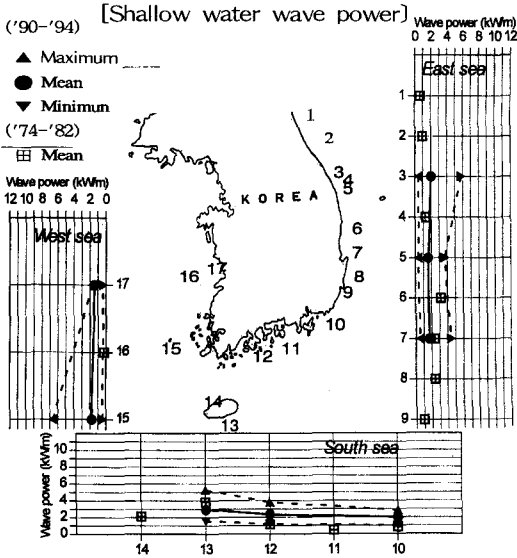
[Deep water wave power]



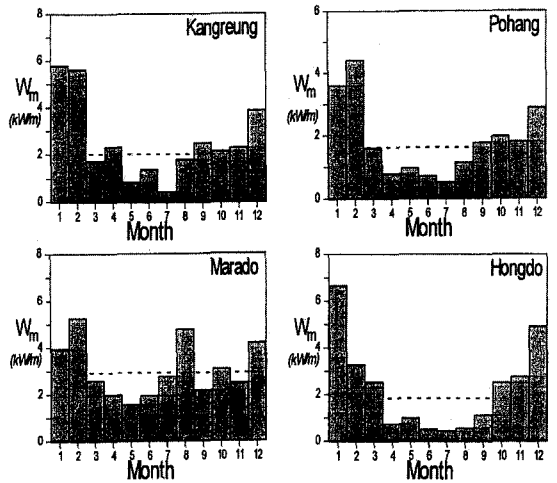
〈그림 3〉 한국연안 심해파 wave power의 분포특성



〈그림 4〉 심해파 wave power의 월별 변동특성



〈그림 5〉 한국연안 천해파 wave power의 분포 특성



〈그림 6〉 천해파 wave power의 월별 변동특성

〈그림 6〉에 나타낸 것과 같이 심해파의 경우와 유사한 변동 특성을 보였다.

3.2. 파랑에너지 취득시스템
우리나라 연안역의 심해파

에너지 부존량은 1.0~6.7kW/m이며 평균 2.4kW/m로 생각할 수 있어 일본의 평균

6.0kW/m에 비해 낮은 편이다. 평균출력 1~2MW급을 대상으로 하면 416-833m의 파랑에너지를 취득장치의 배열이 필요하며, 에너지 변환효율에 따라 그 길이는 연장될 것이다. 따라서 파랑에너지 취득장치를 위한 막대한 비용이 소요되며, 배후 연안역의 이용 계획 및 여건에 따라 다목적시설로서 설계할 경우 경제성 평가는 달라지겠지만 파랑에너지 이용만을 고려하면 경제성이 낮아진다.

파랑에너지 분포량이 많은 해역을 적지로 선정하고 자연지형에 의한 파랑에너지 집중해역 및 인공적인 파랑에너지 집중을 모색할 필요가 있다. 파랑에너지의 집중은 파랑의 변형특성을 적극적으로 이용하는 방안으로서 반달모양, 삼각판 등의 수중 구조물을 이용한 집파시스템으로 연구되고 있다. 또한 파랑에너지를 기계에너지 또는 전기에너지로 변환시키는 변환장치를 입사파 에너지의 규모 및 파주기에 따라 효율이 좋은 시스템으로 개발할 필요가 있다.

우리나라 연안의 파랑에너지를 효율적으로 이용하기 위해서는 효율적인 에너지 취득, 저장, 이용 시스템이 필요하다. 이를 위한 일차적인 단계

가 파랑에너지 가용량 및 입사 파주기에 적합한 파랑에너지 취득시스템이라 할 수 있다.

파랑에너지 취득시스템은 1차변환 및 2차변환 시스템으로 구성되며, 1차변환시스템은 <그림 1>에 나타난 것과 같은 다양한 변환시스템이 있다. 이를 어떻게 이용할 것인가는 대상 해역의 wave power와 주기 및 주변시설에 따라 고려할 수 있다. 파랑에너지 가용량이 클 경우 가동물체형에 비해 수주진동형 변환장치의 파랑에너지 취득 효율이 좋으며, 적을 경우 수주진동형에 비해 가동물체형 변환장치의 파랑에너지 취득효율이 좋은 것으로 알려져 있다. 따라서, 우리나라와 같이 wave power가 작은 경우 가동물체형이 권장된다고 할 수 있다.

또한 대상해역에 방파제나 호안이 있을 경우나 계획되고 있는 경우에는 방파제 겸용으로 설치하여 저반사형 방파제 어구조물로 활용하면서 파랑에너지를 취득, 이용하는 시스템으로 구성하여 다목적화를 통하여 이용효율을 높이거나 투자효율을 높일 수 있다.

여기서, 방파제를 어떤 역할로서 이용할 것인가에 대한 검토가 필요하다. 수주진동형의 경우 방파제 케이스 내부를 공

기실로 활용하여 내부의 수주진동에 의한 파랑에너지를 취득하는 방식이 있으며, 가동물체형의 경우 방파제를 가동물체의 진동축을 유지 및 변환장치 설치 구조물로서 사용하는 방식이 있다.

3.3. 파랑에너지 저장시스템

진술한 바와 같이 우리나라 연안의 파랑에너지는 계절적 변동성이 매우 크며, 월변화, 일변화도 큰 편이다. 따라서 안정적인 이용을 위한 적절한 방안의 수립이 요구된다. 이를 위해서는 적절한 에너지 저장기술이 정립되어야 한다.

지금까지 개발된 저장방법은 전자에너지, 화학에너지, 역학에너지 등의 형태로 저장하는 것이며, 저장시스템의 효율은 55-80% 정도의 수준으로 알려져 있다. 이를 파랑에너지 저장기술로 적용하는 방안이 필요하며, 자동차 배터리 충전, 압축공기 저장 및 발전, 에어레이션 등으로 직접 이용할 수 있다.

3.4. 파랑에너지 이용시스템

파랑에너지의 이용은 파력

발전은 위주로 집약적인 발전을 이루어 왔으며, 이에 대한 실현성 평가가 주종을 이루어 왔다. 대부분의 파력발전시스템은 현재의 경제성 평가기준 하에서 경제성을 인정받지 못하고 있으며, 미래 수요 기술로서 기술체계화 과정에 있다. 한편 산업 발달에 따른 생활수준의 향상 및 여가 선용을 위한 다양한 요구가 제기되고 있으며, 이에 대응하기 위한 다양한 해양시설과 에너지가 요구되고 있다.

따라서 파랑에너지 취득 및 저장시설을 이러한 수요에 부응할 수 있도록 개발하는 것은 파랑에너지 이용시스템의 실용화를 위한 중요한 방안이다. 이는 파랑제어형 파랑에너지 이용시스템에 의해 파랑 에너지를 취득하는 동시에 배후의 정온한 해역을 해양레크

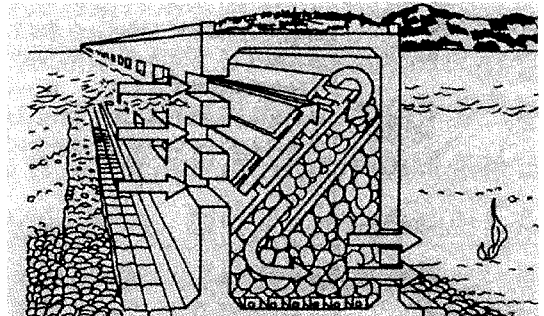
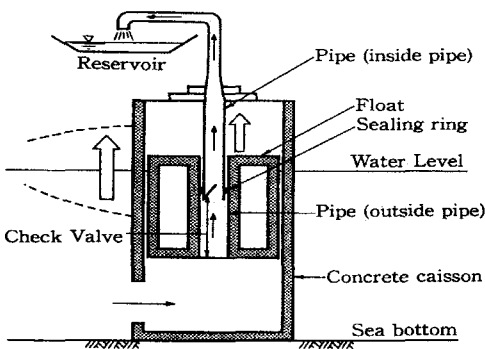
레이션 및 수산양식 활용을 위한 해역으로 사용하는 방안을 생각할 수 있다.

파랑에너지 취득시설을 배열하여 육상수조 양식, 제염 등을 위한 해수를 양수하며, 정온해역을 확보하거나, 해중 분수 등으로 활용하는 방안 등도 생각할 수 있다. 그 예로서 수산 증·양식장 지원형 파랑에너지 이용시스템을 <그림 7>에 나타내었다. 그 외에 월파형 파력발전시스템에서 집수된 해수 낙차를 이용하여 발전을 하면서 그 해수를 양식 또는 제염공장에 공급하는 방법, 어초기능을 겸한 파랑에너지 집중시설화 및 해저 압축공기저장시설의 어초기능화 등의 복합기능화를 통한 이용 고도화가 이루어져야 할 것이다.

또한 이와 관련하여 생각해

볼 수 있는 것이 취득에너지의 현장사용이다. 파랑에너지의 취득지와 수요지인 가정이나 산업시설이 멀리 떨어져 있는 경우 에너지의 직접이송 또는 간접이송이 필요하다. 직접이송 방법은 전력의 경우 전선으로 송전하는 방법이며, 압축공기나 유동을 사용할 경우 파이프 라인으로 이송시키는 방안이다. 간접이송 방법은 다른 에너지 물질(수소 또는 암모니아 제조)로 변환시켜 수송시키는 방법이다.

그러나 이송거리가 경제성을 고려한 임계치보다 커지고 멀어지면 이송비용이 문제될 수가 있으므로 현장사용이 권장된다. 이는 파랑에너지를 취득장소에 인접한 수산 증·양식시설이나 해상플랜트에 전기나 동력으로 공급하는 방법이다. 즉, 육상으로부터 상



<그림 7> 파랑에너지를 이용한 환경개선 및 양식장 해수양수시스템

용전기를 송전해 오기가 쉽지 않거나 비용이 많이 드는 이안형 해상플랜트나 수산시설의 경우를 생각할 수 있다.

3.3. 복합 해양에너지 이용 시스템 구축

다양한 파랑에너지 취득시스템이 개발되어 있으나 그 출력이 그다지 높지 않으며, 파랑에너지의 출현특성에 따른 출력에너지의 변동성도 큰 편이다. 수요량에 따라 파랑에너지 변환장치를 병렬 설치하여 기대출력에 맞출 수도 있지만 경제적인 문제를 고려하여야 한다.

따라서 출력이 낮을 경우 보완할 수 있는 방안으로서 복합 해양에너지 이용시스템을 생각할 수 있다. 이는 대상해역의 가용 자연에너지를 통합적으로 취득, 저장하고 이용하는 방법으로 생각할 수 있다.

예를 들면 파력발전장치의 상부에 태양전지를 부가한다면 파력발전과 병행하는 방법을 생각할 수 있다. 또한 항내 해수교환을 위하여 조류에 의한 해수교환과 파랑에 의한 해수도입을 통합시키는 방안도 생각할 수 있다. 또한 방파제형 파력발전장치 주위의 연안

류를 이용한 해류발전 등을 생각할 수 있다.

4. 결론

파랑에너지의 이용기술은 화석에너지의 고갈에 따른 대체에너지 개발과 화석연료의 소모에 따른 지구온난화 예방 등을 위하여 중요한 에너지 이용기술이다. 따라서 파랑에너지 실용화를 위한 기술의 개발 및 체계화가 절실히 요구되고 있다.

여기서 파랑에너지 이용개발에 대한 현황을 조사하여 문제점을 정리함으로써 실용화를 위한 기초를 제공하고자 한다. 조사 결과, 항로표지용 파력발전장치(100W급)와 같이 실용화된 경우도 있으나 대부분이 실용화되지 못한 미래 대비 기술로 자리하고 있는 실정이다.

우리나라 연안에는 동해에 평균 1.8-7.0kW/m, 남해에 평균 1.5-5.3kW/m, 서해에 평균 1.0-4.1kW/m의 wave power가 부존하고 있으며, 계절적 변화가 심하였다. 전 연안에 걸친 파랑에너지 가용량은 약 4.7GW에 달하는 것으로 평가된다.

따라서 에너지 밀도가 비교적 낮아 파랑에너지 집중기술

및 이에 적합한 변환장치의 개발이 요구된다. 또한 시간적 변동성이 강하여 실용화를 위해서는 적절한 에너지 저장 및 이송기술이 필요하며, 현장이용 또는 다른 해양에너지와의 복합이용시스템 구축이 필요한 것으로 판단된다.

따라서 파랑에너지의 실용화를 위해서는 1)파랑에너지 분포량의 조사 및 평가 2)에너지 밀도 증대를 위한 파랑에너지 집중기술 정립 3)파랑에너지 가용량에 적합한 1차 변환장치 개발 4)고효율 변환장치의 개발 5)에너지 변동성에 대응한 에너지 저장기술의 개발, 6) 에너지 취득 및 사용장소의 격리에 따른 저장 또는 이송기술 개발 7)사용목적에 따른 변환단계 감축 8)현장(직접) 및 복합 이용시스템의 개발 등이 필요할 것으로 생각된다. ㉠