

해양에너지의 복합이용에 의한 실용화 연구

김현주 · 홍석원 / 한국해양연구원 해양개발시스템연구본부

1. 서 론

최근, 자원 보유국은 자원 무기화 추세에 있으며, 에너지 자원의 안정적 확보가 없이는 산업의 안정적 발전을 보장할 수 없으므로 이에 대한 대책이 요구되고 있다. 특히, 수입 의존도가 높은 우리나라는 가용한 자원의 개발 및 효율적인 이용을 통하여 지속 가능한 산업 개발 및 발전을 위한 에너지 개발 및 이용기술의 정립이 절실히 요구된다.

한편, 화석연료는 그 소모에 따른 고갈 심화 및 지구 온난화의 주요 원인으로 지적되고 있어, 청정한 대체에너지의 개발이 절실히 요청되고 있다.

지구 표면의 70% 이상을 차지하는 해양으로 흡수된 태양에너지는 다양한 형태로 변환되어 해양에 존재하며 이와

같은 해양에너지를 활용한 대체에너지로서 파랑에너지를 이용한 파력발전, 조석간만의 차를 이용한 조력발전 등이 대표적으로 실용화 가능한 대상이며, 심해수와 표층수간의 온도차를 이용한 온도차 에너지를 이용한 온도차발전(OTEC) 등도 가능성 있는 대상이다. 또한 최근에는 조류나 해류가 가지고 있는 운동에너지를 활용하는 해류발전 기술도 개발되고 있다. 한편 해양에는 육상에서도 개발되고 있는 풍력에너지와 태양광에너지 자원도 풍부히 존재하고 있다.

그러나, 해양에너지는 시간과 장소에 따라 변화하는 변동성과 분산성을 갖고 있다. 따라서, 여러 가지 종류의 해양에너지원을 복합적으로 활용함으로써 변동적이고 분산적인 에너지원을 취합하여 안정적으로 에너지를 생산할 수 있

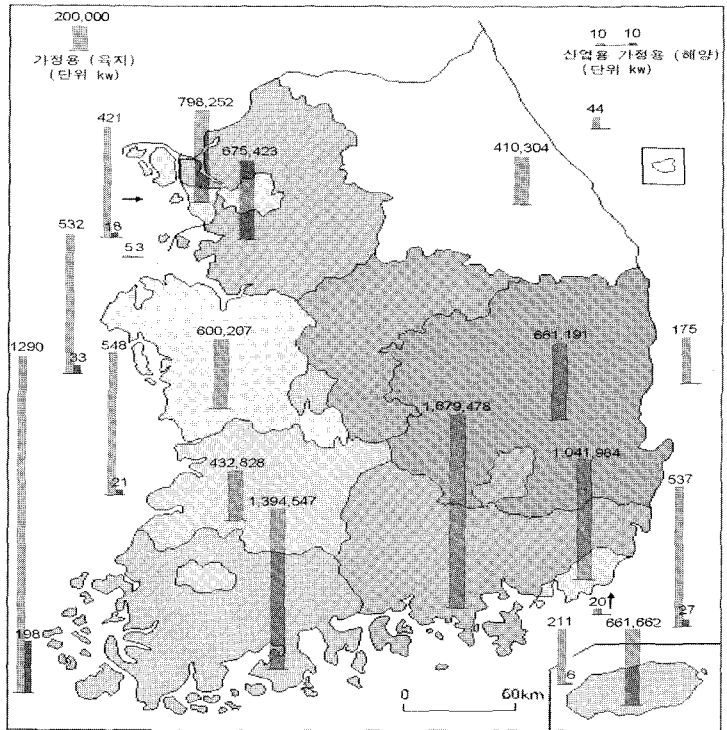
고 또 취득한 에너지를 현장 근처에서 유용하게 활용함으로써 해양의 환경개선과 연안의 생산성 증가를 추구할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 이러한 특성을 가진 해양에너지를 복합화하여 이용함으로써 실용화하기 위한 방안을 모색해 보고자 하였다. 이를 위해, 우리나라 주변해역에서의 대체에너지 수요와 해양에너지 자원부존량에 대해 평가하고, 이를 해역별 특성에 맞게 복합화하는 방안을 모색하고자 하였다. 그 결과로서 해양에 존재하는 자연에너지원을 복합적으로 활용할 수 있는 시스템의 개발방안 및 에너지의 현장 활용방안 등에 대해서 고찰하였다. 또한 이를 어항 및 해안보호 구조물의 개발 및 시설에 적용할 수 있도록 제시하고자 하였다.

2. 해양에너지 수요분석

해양에너지는 아직 경제성이 부족한 것으로 알려지고 있으며, 이는 화석연료의 환경보상비용이 고려되지 않고 있기 때문이다. 한편 전력공급 기반시설이 갖추어지지 않은 낙도나 연안역은 전력공급 비용이 높아질 수 밖에 없기 때문에 해양 에너지의 개발이 유망하다. 이러한 관점에서 연안역과 낙도를 대상으로 해양에너지 수요를 정리하여 보았다. 여기서 에너지 수요는 가정용과 산업용으로 나누어 정리하였고, 산업용의 경우 수산양식 시설을 위한 것으로 한정하였다.

여기서 전력수요 산정기준은 가정용은 가구당 3kW, 산업용은 수산양식별 육상식 4kW/ha, 해상식 3kW/ha, 축제식 2kW/ha가 소요되는 것으로 가정하여 산정한 것이다. 그 결과를 <그림-1>에 나타내었으며, 각 시도별 대체에너지 수요는 수산업용이 20~1,290kW에 달하며, 미전화 도서의 가정용은 6~1,980kW에 달하였다. 이러한 수요를 고려하여 복합이용에 의한 실용화 플랜트의 단위시설 규모를 결정하고 개발 방향을 표정하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.



<그림-1> 연안 및 낙도에서의 대체에너지 수요

3. 해양에너지 이용 기술 현황 및 에너지 분포 특성

해양에는 다양한 에너지가 부존하고 있으며, 파랑, 조류 및 해류, 조력, 풍력, 태양광 등을 들 수 있다. 이들을 복합화하기 위해서는 각 이용기술의 현황과 가용 에너지 밀도를 살펴보는 것이 첫 번째 과제일 것이다. 이로부터 각 해양에너지의 이용기술과 분포특성을 간단히 살펴보고 복합이용을 위한 해양 에너지의 복합분포 특성을 조사하기로 한다.

(1) 파력

파력에너지는 파랑작용에 의한 운동 및 위치에너지로서 통상 파고가 높은 해역에서의 이용이 유망한 것으로 판단되고 있다. 이를 위한 이용기술은 파랑에 의한 장치운동으로서 가동물체형, 진동수주형 및 수압면형이 개발되고 있으며, 파랑변형 이용으로서 월파형, Set-up형 및 쇄파형이 있다. 여기서 전자는 주로 발전을 목적으로, 후자는 주로 송수 및 해수교환을 목적으로 적용되고 있다.

외국에서는 영국, 일본, 노르웨이, 호주, 스웨덴, 인도

등에서 활발히 연구되고 있으며, 최근, 영국과 호주 등에서는 수MW급의 파력발전 모델을 개발하여 상용화에 열을 올리고 있다. 한편, 우리나라에서는 한국해양연구원이 60kW급 부유식 원주형 발전장치를 개발하여 울산 주전에서 실험을 수행한 바 있다.

파력에너지 밀도는 다음 식에 의해 산정할 수 있다.

$$W_w = 0.5H_{1/3}^2 T_{1/3} \text{ (kW/m)}$$

$H_{1/3}$: 년평균 유의파고,

$T_{1/3}$: 년평균 유의파주기

(2) 조력

조력에너지는 해면의 상하운동에 의한 위치에너지를 활용하는 것으로 조석간만의 차가 큰 지점에서 이용이 유망한 것으로 판단된다. 조석에너지의 이용은 1저수지 일방향발전방식과 1저수지 양방향 발전방식 및 2저수지 양방향 발전방식으로 강구되고 있다. 따라서, 조차가 매우 큰 우리나라의 서해도 유망한 후보지로 손꼽히고 있다.

외국에서는 240MW급 랑스 발전소를 건설한 프랑스를 필두로 하여 영국, 캐나다, 미국, 중국, 인도, 러시아 등에서 실증연구 또는 실용화되고 있다.

우리나라도 조차가 매우 크므로 유망한 해양에너지이며, 한국해양연구원이 10개 지점

을 대상으로 타당성을 검토한 바 있고, 그 중의 유망후보지인 가로림만의 경우 20MW급 24기를 시설하면 480MW를 발전할 수 있을 것으로 평가한 바 있다. 또한 시화호의 경우 200~240MW 정도로 추정되고 있으나, 여러 가지 사항을 복합적으로 고려하여야 하므로 검토 중에 있다.

조력에너지 밀도는 다음 식에 의해 산정할 수 있다.

$$\frac{W_t}{A} = \rho_w g V_c H \text{ (W/m}^2\text{)} \\ \approx 9.8QH \text{ (kW/m}^2\text{)}$$

ρ_w : 해수밀도(1,025kg/m³),

V_c : 유속(m/sec),

A : 투과면적(m²),

H : 수위차(m),

Q : 유량(m³)

(3) 조(해)류력

조(해)류력에너지는 해수운동에 의한 운동에너지이므로 통상 흐름이 강한 해역에서의 이용에 유용한 것으로 판단된다. 이를 위한 이용기술은 프로펠러 터빈방식, 사보니우스형 수차방식, 다리우스형 수차방식, Cross flow 수차방식, Voith-Schneider 프로펠러방식, Sail canopyqkdtlr, 전유향형 종축 수차방식 등으로 개발되고 있다.

외국에서는 프랑스, 미국, 일

본 등에서 0.8~500kW에 대한 실증실험 연구가 수행된 바 있고, 조합에 의한 140MW급 개발계획 등도 제안되고 있다.

우리나라에서도 1963년 명량해전의 현장인 울돌목에서 조류발전을 시도하였으나 실패한 바 있다. 이 곳은 썰물시 10 노트에 달하는 강류로 유명하며, 이곳에 조류발전소가 건립되면 국내 수력발전의 16%에 해당하는 5백메가와트의 전력이 생산될 수 있을 것으로 전망되고 있다. 최근, 한국해양연구원은 다리우스형 수차방식의 하나인 Hellical 터빈을 이용한 조류발전시설을 울돌목에 설치하여 실증하는 계획을 수행 중에 있다.

조류에너지 밀도는 다음 식에 의해 산정할 수 있다.

$$\frac{W_t}{A} = 0.5\rho_w V_c^3 \text{ (W/m}^2\text{)} \\ \approx 512.5V_c^3 \text{ (kW/m}^2\text{)}$$

ρ_w : 해수밀도(1,025kg/m³),

V_c : 유속(m/sec),

A : 투영면적(m²)

(4) 풍력

풍력에너지는 대기 운동에 의한 운동에너지이므로 바람이 강한 해역이 대상이 된다. 따라서 우리나라에서는 제주, 울릉도 등의 바람이 강한 해안가에 육상형으로 많이 설치되

어 있다. 풍력발전 이용기술은 수평축형식과 연직축형식으로 대별되어 발전되어 왔다. 수평축에는 블레이드의 수에 따라 1익형, 2익형, 3익형 및 다익형 등으로 개발되고 있고 효율은 45~46%로 주장되고 있으며, 연직축형은 H형, 델타형, 다이아몬드형, Y형, 파이형 등으로 개발되고 있고, 그 효율은 43~45%에 달하는 것으로 추정되고 있다.

외국에서는 현재 시점에 실용화가 가장 유망한 대체에너지로 판단하여 독일, 미국, 덴마크, 인도, 스페인, 네덜란드, 영국, 중국, 이태리, 스웨덴 등지에서 육상을 중심으로 수많은 풍력발전장치를 시설하여 수천 MW씩 발전하고 있으며, 최근에는 해상 풍력으로 관심을 돌리고 있다.

우리나라에서도 100~750kW급 풍력발전장치가 한국에너지연구원 등에 의해 시설 및 운영되어 작년까지 발전용량누계가 6.6MW에 달한 것으로 조사되었다.

풍력에너지 밀도는 다음 식에 의해 산정할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{W_g}{A} &= 0.5\rho_a V_g^3 (W/m^2) \\ &= 0.6125V_g^3 (kW/m^2) \\ \rho_a &: \text{공기밀도 } (1.225\text{kg/m}^3), \\ V_g &: \text{풍속(m/sec)}, \end{aligned}$$

A : 투영면적(m²)

(5) 태양광에너지

태양에너지는 열에너지와 광에너지로 활용될 수 있으며, 열에너지는 주로 난방용 등으로 보급되어 왔고, 광에너지가 발전용으로 개발되어 왔다. 따라서 광전효과로서 흡수할 수 있는 태양광에너지가 풍부한 곳이 유망하므로 일사량이 풍부한 해역에서 태양광발전이 이루어지고 있다. 한편 태양광발전은 실리콘 태양전지, 화합물 반도체 태양전지 및 신형 태양전지 등으로 연구개발되고 있으며, 그 효율은 8.9~23.3%에 이르는 광범위한 범위인 것으로 추정되고 있다.

외국에서도 독립형, 계통연계형, 복합형 등으로 다양한 분야에서 실용화 보급이 이루어지고 있으며, 우리나라에서는 현재 독립형 및 계통연계형으로 개발되어 독립형은 30~550kW급이 마라도, 호도, 와도 등에 시설 및 운영되고 있고, 계통연계형은 삼성종합기술원, 전력연구원 등이 3~100kW를 설치 및 운영 중에 있다.

태양광에너지 밀도는 다음 식에 의해 산정할 수 있다.

$$\frac{W_s}{A} = I_{\max} \cdot \sin\left(\pi \frac{\theta}{L}\right) \quad (kW/m^2)$$

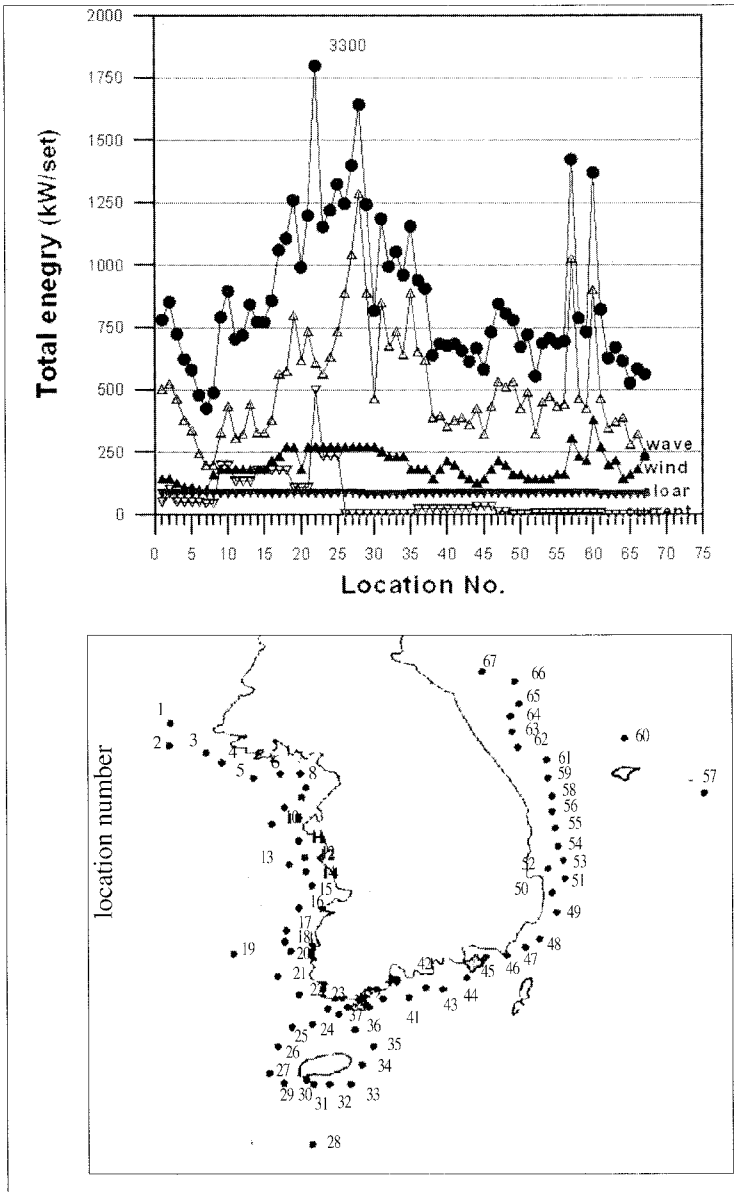
I_{\max} : 최대에너지 (~1kWh/m²),

θ : 일출과의 시간차,

L : 일사시간 길이

우리나라 연안역에서 복합해양에너지 분포를 산정해 보기 위해 각 해역의 해양에너지 분포 및 변동특성을 산출하였고, 그 결과를 종합하여 복합해양에너지 분포도로서 <그림-2>에 나타내었다. 여기서 각 해양에너지 활용시스템은 파력의 경우 500kW급, 조류력은 500kW급, 풍력은 600kW급, 태양광은 500kW급을 적절히 배열하여 조합하는 것으로 가정하였다. 그 결과 그림으로 부터 남해 및 동해의 일부 해역에서 높은 에너지 밀도가 분포하고 있음을 볼 수 있고, 파일롯 플랜트의 경우, 500~3.3MW가 발전 가능할 것으로 판단하였다.

복합 해양에너지는 일간 및 계절별 변동을 하게 되며, 월간 변동특성을 <그림-3>에 정리해 놓았다. 그림으로 부터 동해 및 서해는 동계에, 남해는 하계에 높음을 알 수 있다. 이로부터 해양에너지의 분산성 및 변동성을 완화하기 위해서는 복합이용이 필요함을 알 수 있고, 해역별로 <그림-4>와 같은 복합화를 대상으로 하는 것이 바람직할 것으로 생각된다. 즉 동해의 경우, 파력, 풍력, 온



〈그림-2〉 우리나라 주변해역에서의 복합 해양에너지 분포특성

도차 및 태양광, 남해의 경우, 조류력, 파력, 풍력 및 태양광, 서해의 경우 조력, 조류력, 풍력 및 농도차 등으로 복합화하는 것이 유망할 것이다.

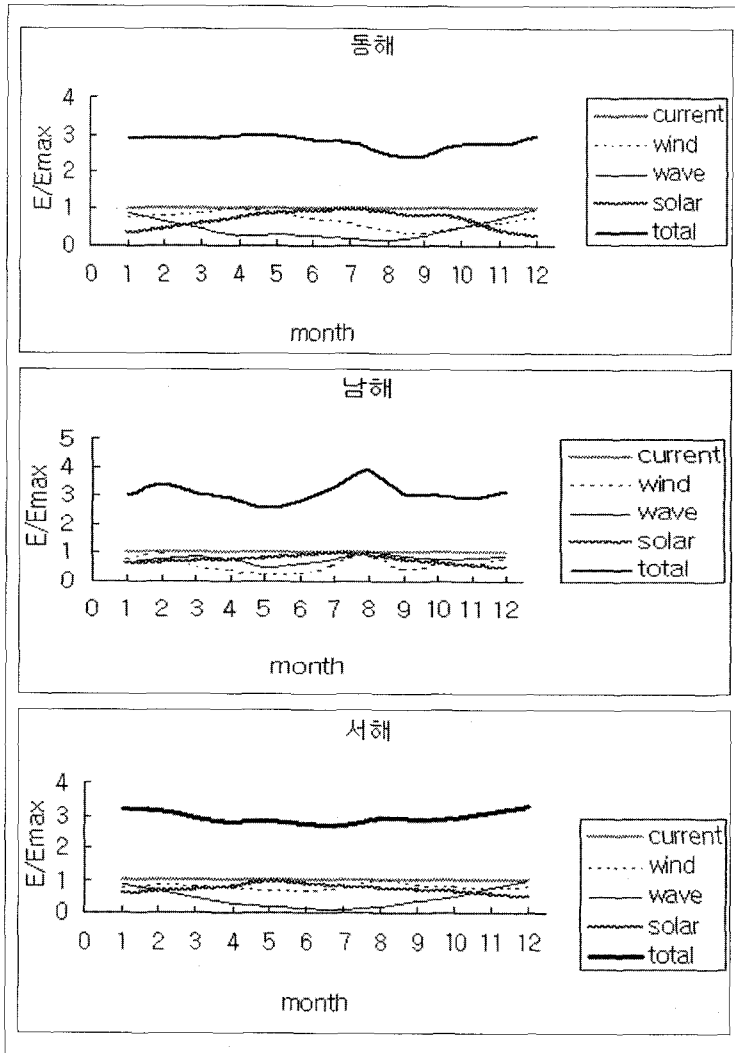
4. 해양에너지의 복합이용 시스템의 개발 방향

해양에너지의 복합화는 에너지 취득의 복합화 뿐 아니

라 활용기능의 복합화를 병용하여 효율을 극대화 할 수 있다. 복합에너지 취득방안은 해양구조물을 기반으로 해양 에너지를 취득할 때, 대상 적지에서 취득 및 이용 가능한 여러 가지 에너지 자원을 흡수할 수 있도록 조합하는 방안이며, 활용기능의 복합화 방안은 해양에너지 취득 및 이용 시설을 에너지 흡수 및 저장 기능뿐 아니라 해역정온화, 해역정화, 해상 생산-교육-관광 등을 위한 기반시설로서 활용하는 방안이다. 따라서 해양에너지의 흡수 및 이용을 위한 기반시설의 초기 투자비를 감소시킴으로써 실용화를 도모할 수 있을 것이다. 특히 미개발 연안역이나 미전화 도서 등에서 어항 개발 또는 연안 방재를 위한 시설의 설계 및 설치시 이를 다기능화하는 것은 연안공간의 안전한 이용 및 에너지 자급화를 위한 중요한 개발방향이 될 수 있을 것으로 판단된다. 여기서는 전자를 중심으로 검토하면서 기반구조물의 다목적 활용을 검토해 보기로 한다.

4.1 해양에너지 복합이용 플랜트

해양형 복합 해양에너지 이용시스템은 해양에 대한 육전



〈그림-3〉 복합 해양에너지의 월별 변동특성

공급의 비용 및 위험성을 회피하고, 해양구조물의 가동성에 부응하는 자체 보급형 에너지 원으로서 개발하고자 하는 것이다. 이는 〈그림-5〉와 같은 모듈로 구성하여 용도에 따라 적절히 배열 및 활용이 가능하며, 해상에서 풍력 및 태양광

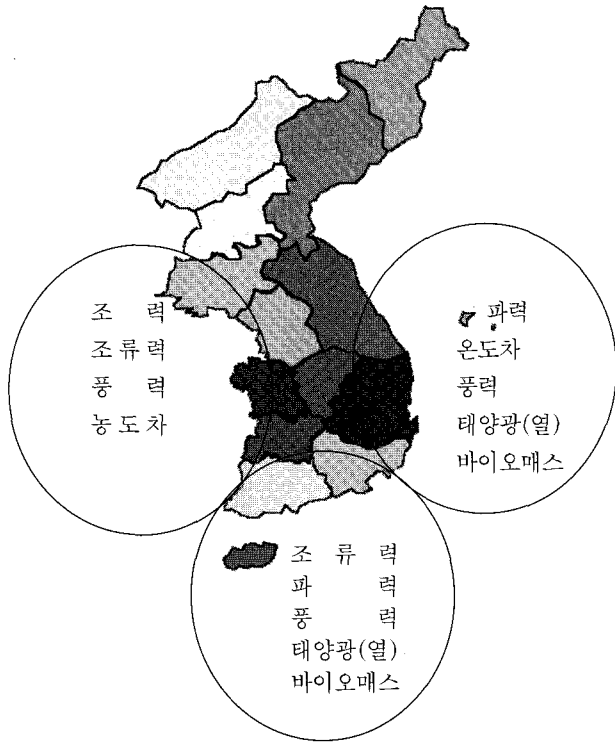
발전, 해면에서 파력발전, 해중에서 조류력 발전을 합리적으로 복합화 하는 것이다. 이러한 해양플랜트형 시설은 해역 정온화를 위한 부유식 방파제 등에 부가 설치 및 활용함으로써 경제성을 제고시킬 수 있을 것이다.

4.2 해양에너지 복합이용 방파제

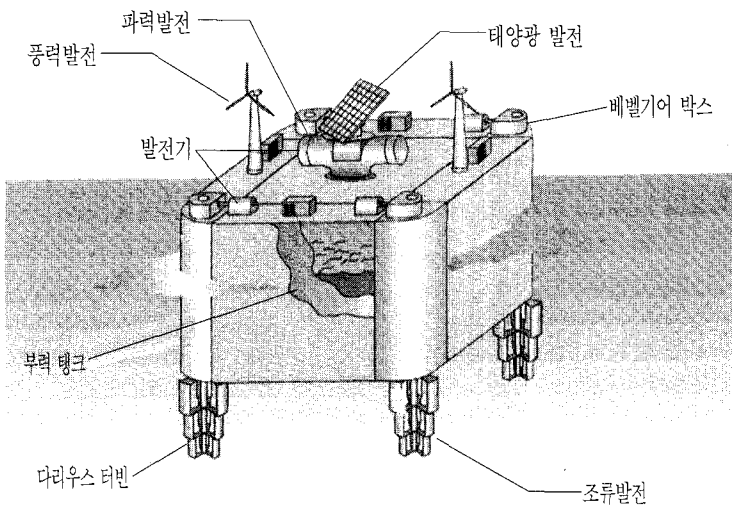
해안(항만)형 복합 해양에너지 이용시스템은 낙도 등에 대한 육전 공급의 비용 및 위험성 회피하고, 친수성 연안역 개발을 위한 전천후 해안공간 이용기반을 제공할 수 있도록 함으로써 방파제 겸용에 의한 기반구조물에 대한 시설비를 최소화할 수 있다. 그 활용방안의 한 예를 〈그림-6〉에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이, 방파제의 전면에 우수실을 만들어 공기실을 조성하고, 그 배후에 파력발전장치를 설치하면 파력발전이 가능하며, 상부에는 풍력발전장치와 태양광발전장치를 시설하여 복합화하는 것이다. 이러한 방향은 해양에너지 이용에서 기반시설을 다목적화함으로써 경제성을 제고시킬 수 있는 방안의 하나로서 검토될 수 있다.

5. 해양에너지의 복합이용 시스템의 타당성 검토

해양에너지의 복합이용 시스템은 해양에너지의 분산성 및 변동성을 해소함으로써 청정에너지를 실용화시킬 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 이러한 해양자원의 개발 및 해양공간의 이용도 경제성이 보장되지 않음



〈그림-4〉 해역별 해양에너지의 복합화 방안



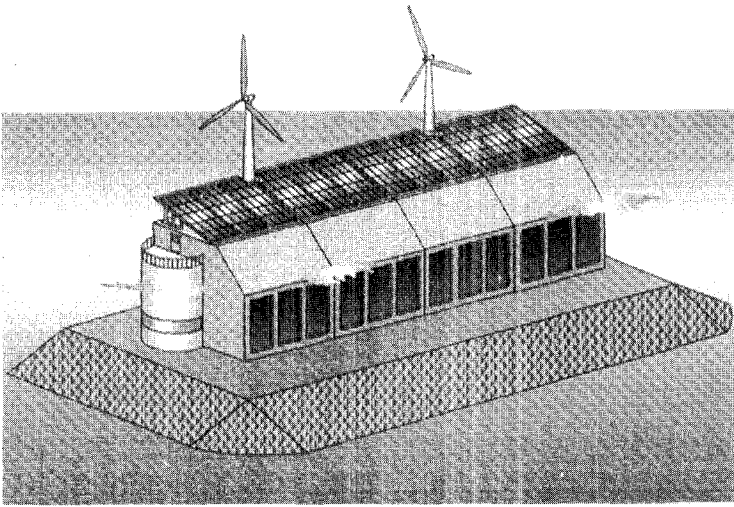
〈그림-5〉 해양플랜트형 해양에너지 복합이용모델

면 실용화가 늦어질 수 밖에 없다. 물론, 현재도 전력단가에 환경복구 및 보상비용이 포함되지 않았으며, 해양에너지의 청정성에 의한 직간접적 효과가 계량되지 않았기 때문에 해양에너지는 화석연료 전력에 비해 생산단가가 높은 실정이다.

이러한 문제를 완화할 수 있다고 판단되는 복합화 방안에 의한 경제성을 종합적으로 비교하여 〈표-1〉에 정리하였다. 해양에너지를 비롯한 다양한 대체에너지는 발전단가가 92~360 원/kWh로서, 원자력이나 화력발전 등의 34~60원/kWh에 비해서는 비싼 편이다. 여기서 복합이용시스템의 발전단가는 pilot plant의 제작비 및 출력을 고려하여 산정한 것이며, 상용화 규모를 대상으로 하면 경제성은 훨씬 향상될 것으로 판단된다. 최근 이산화탄소의 배출과 관련한 배출권의 매매 등에 의한 편익이 증대되면 경제성은 보다 증대되게 될 것이다.

6. 결론

해양에는 풍부한 에너지가 부존하고 있어 미래 인류를 위한 환경친화적 에너지의 하나로 주목받고 있다. 그러나 해양에너지는 분산성과 변동성이 있으며, 이러한 특징을



〈그림-6〉 방파제형 해양에너지 복합이용모델

〈표-1〉 해양에너지 복합이용시스템의 경제적 타당성 검토

형 식	시설단가	발 전 단 가	
	미국 (\$/kW)	일본 (¥/kWh)	한국 (₩/kWh)
원 자 력	2,500		34
화력발전(석탄)	1,500		38
화력발전(석유)	1,300	24.1(12)	60
수 력 발 전	1,500~2,500		
태양광발전	5,000~8,000		360
풍 력 발 전	900	20~25	92~103
해류발전	Ocean Power Farm		2,140
	일 반 형		33.3(33)
파력발전(고정식)		22.8(17.2)	
조 력 발 전		77.7(73)	
복합 이용시스템		원자력 동일	109~126
비 고	()는 환경복구비용 제외시의 비용		

감안하여 효율적으로 활용하기 위한 방안이 필요한 것으로 판단되었다. 이를 극복하기 위해, 다양한 해양에너지를 복합

적으로 이용하는 “복합 해양에너지 활용시스템”에 대한 조사 분석을 통해 시스템 개발 방향을 정립해보고자 하였다.

복합 해양에너지의 활용시스템 기술개발을 위해 (1)해양 에너지의 수요를 분석하고, (2)해양에너지 자원의 분포 및 변동성을 조사 및 분석하고, (3)이에 기초한 복합화 방안 정리하였으며, (4)해양에너지의 복합이용을 실현하기 위한 해양 및 해안(항만)에서의 활용시스템 제안하고, 경제적 타당성을 고찰하였다.

이로부터 낙후된 연안역이나 낙도에 어항시설물 또는 해안 방재 구조물을 건설할 경우에는 이러한 개념을 적용하여 기능시설물을 다기능화하고 개발 효율성을 높이는 노력이 필요할 것이며, 본 연구가 이러한 실용화를 위한 초석의 하나로서 활용되기를 기대한다.

사 사

본 연구는 과학기술부의 연구기획사업 “복합 해양에너지 활용시스템 기술개발 기획연구” 결과의 일부이므로 그 지원에 깊은 감사를 표한다.㉑