한국마린엔지니어링학회지 제34권 제6호, pp. 894~905, 2010. 9 (ISSN 1226-9549)
Journal of the Korean Society of Marine Engineering

서식지 평가 방법을 이용한 바다숲 조성 해역의 적지 선정

오태건† · 김이청[1] · 양용수[1] · 김창길[2] · 이문옥[3]

(원고접수일 : 2010년 6월 10일, 원고수정일 : 2010년 7월 26일, 심사완료일 : 2010년 9월 17일)

A Suitability Selection for Marine Afforestation Using Habitat Evaluation Procedure

Tae-Geon Oh† · Yi-Cheong Kim[1] · Yong-Su Yang[1] · Chang-Gil Kim[2] · Moon-Ock Lee[3]

요 약 : 바다숲 조성 해역에 대상 해조류의 최적 적지를 도출하기위해 서식지 평가 방법을 이용하였다. 서식지 평가 방법은 HEP(Habitat Evaluation Procedure)를 이용하여 대상 해조류가 서식하기에 적합한지를 고려하여 수행하였다. 그 결과 바다숲 조성 해역에서 바다숲을 시설하기에 최적으로 예측되는 곳을 계량적으로 선정할 수 있었으며, 적지 선정에는 수심의 변화에 따른 인자인 광조건과 파랑의 변화 여부가 적지의 공간적 변동에 가장 큰 영향을 주는 것으로 나타났다. 선정된 적지의 총 면적은 18ha로 분석되었으며, 서식 적합 지수(Habitat Suitability Index, HSI)에 의해 분석된 서식지의 질을 계량화한 결과 0.55~0.907(최고치는 1.0) 사이의 범위를 보였고, 선정된 적지가 등 수심선 방향을 따라 분포하고 있기 때문에 바다숲 조성지에 기반 시설인 해중림초를 투하할 때, 수심에 수평 방향의 띠 형태로 시설하는 것이 가장 바람직할 것으로 판단된다.
주제어 : 바다숲, 계량 적지 선정, 서식지 평가, 서식 적합 지수, 공간 분포도

Abstract: A habitat evaluation method was used to estimate the optimum suitability of the study area for the target algae. Habitat evaluation was carried out using an habitat evaluation procedure (HEP) so that the optimum suitability was quantitatively estimated for carrying out marine afforestation in the study area. According to the results of the suitability analysis, the variation of light and wave conditions according to depth showed the factors with the largest impact to involve the spatial distribution of suitable locations within the area. The total suitable area selected was calculated to be 18ha. The quality of the target algae (*Ecklonia cava Kjellman*) habitat was analyzed using an habitat suitability index (HSI) model of the HEP, which showed 0.55-0.907 (the maximum value being 1.0). This indicated that artificial reefs for afforestation should be installed to zonation type because the suitable area selected (The HSI value was 0.55~0.907) was distributed within the same depth line.
Key words: Marine afforestation, quantitative suitability selection, Habitat evaluation procedure (HEP), Habitat suitability index (HSI) model, Gridded spatial distribution map (GSDM)

1. 서 론

바다숲을 조성하기 위해서는 많은 요소 기술이 필요하다. 특히, 해조류가 서식하기 위해서는 착생 기반이 반드시 필요하므로, 해중림초나 자연석과

† 교신저자(국립수산과학원 자원조성사업단, E-mail: dharta@nfrdi.go.kr, Tel: 051-720-2361)
1 국립수산과학원 자원조성사업단
2 국립수산과학원 전략연구단
3 전남대학교 해양기술학부

같은 기반 시설물을 바다숲 조성지 내에 시설하여야 한다. 그런데 이와 같은 기반 시설들을 설치하는 경우, 조석류나 파랑으로 인해 발생하는 유체력에 의해 시설물의 전도나 활동이 일어날 수 있으므로 이들에 대한 충분한 검토가 필요하다. 이는 조성대상해역의 물리 및 공학적 특성과 관계가 있는 것이며 기반 시설물의 항구적인 기능 발휘를 위해 중요한 요소라고 할 수 있다. 현재까지 수산 자원을 조성하기 위한 적지의 분석은 기반 시설물의 안정성에 초점을 두고 있다[1-3]. 하지만, 바다숲 조성은 해조류를 중심으로 하여 수산 자원을 조성하는 방법이므로 바다숲 조성지에 대한 해조류의 서식환경이 자세히 분석되어야 할 뿐만 아니라 적지 조건을 계량화하는 것도 매우 중요한 요소라고 할 수 있다. 그러므로 바다숲 조성지에 대한 적지의 분석은 기반 시설물의 안정성에 대한 적지와 대상 해조류의 서식조건에 관한 적지 기준으로 구분하여 검토되어야 한다. 따라서 이들 두 적지 조건을 모두 충족할 수 있는 후보지를 적지로 채택함으로써 바다숲을 조성하는 데 효과적일 것이다.

현재까지 수산 자원 조성의 시설지에 대한 적지의 계량 분석은 거의 이루어지지 않은 상태이며, 오 등[3]에 의해 거문도 해역의 바다숲 조성지에서의 물리적 내용을 주로 다룬 기반 시설물에 대한 안정성에 대하여 분석된 예가 있으나, 대상 종에 대한 서식지의 계량분석은 현재 이루어지지 않고 있다. 본 연구에서는 바다숲 조성 대상종에 대한 서식지를 계량적으로 분석하기 위해 HEP 방법을 도입하였다. HEP는 미국에서 1969년 NEPA (National Environmental Policy Act)에 의해 생태계 등의 환경 가치를 계량적으로 파악하기 위해 고안된 서식지 계량 평가 방법으로서, 서식지는 그 종에 있어서 측정 가능한 서식지 변동 요소(변수)들에 의해 표현 가능하다는 가정에 기초하고 있으며, "서식지의 가치는 양과 질의 어느 쪽의 변화에도 영향을 받을 수 있다."라고 하는 가정도 동시에 수용할 수 있어야 하는 것으로 정의하였다. 그러므로 서식지의 양은 대상지의 면적이 될 수 있으며, 질은 각각의 서식지에 영향을 줄 수 있는 수온, 염분 등의 환경적 요소들의 총합이 될 수 있는 것으로 가정한다[4].

따라서 본 연구에서는 이러한 HEP의 정의를 이용하여 바다숲 조성 해역에 대한 해양 환경을 분석하고 그 해역의 환경특성이 대상 해조류가 서식하기에 얼마나 적합한지를 계량화함으로써 바다숲 조성 대상 해조류의 생태적 적합 기준을 고려한 적지 선정 방법을 제안하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1 연구 해역 및 해양 환경 분석

연구 대상이 되는 거제도 남부 해역은 대조차가 2m 내외의 반일주조가 우세한 해역이다. 평균 유속은 대조기시에 창·낙조류 공히 0.2~0.8 m/s 정도로 비교적 완만한 유속을 지니고 있으며, 해류의 영향도 비교적 많이 받는 곳이다[5]. 분석된 항목은 수온, 염분, 수소 이온 농도(pH), 화학적 산소 요구량(COD), 암모니아 질소(NH_4^+-N), 용존 무기인(DIP), 용존 무기질소(DIN)였고, 계절별(2, 5, 8, 11월)로 12년간의 자료를 획득하여 그 추이를 분석하였다. 수온과 염분은 CTD로 측정하였으며, 일반 수질 항목은 해양 환경 공정시험 방법으로 분석되었다[6]. 연구 해역의 위치는 **Figure 1**과 같으며, 연구 해역에 대한 해양 환경을 파악하기 위해서 연구 해역 부근의 국립수산과학원의 국

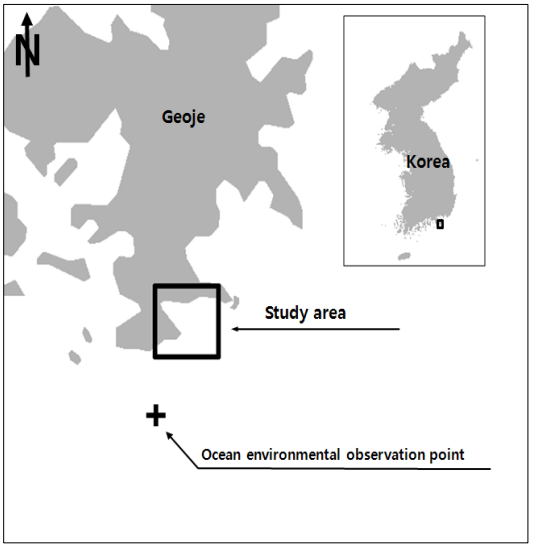


Figure 1: Map showing the study area.

가 해양 관측망 자료를 이용하여 분석하였다. 연구 해역과 해양 환경 측정점의 위치가 다소 차이가 있으나, 연구 해역은 담수가 유입되는 하구 역이 존재하지 않기 때문에 육상 기인의 영양염류의 유입은 거의 없을 것으로 판단되며, 수온 및 염분의 변화도 전 해역에 걸쳐 일정할 것으로 판단되어, 국립수산과학원의 자료를 이용하여도 큰 무리가 없을 것으로 판단된다. 또한, 해조류의 생장에 큰 영향을 미칠 것으로 보이는 투명도는 투명도판을 이용하여 대형 갈조류가 농밀하게 서식하는 3월에 연구 해역에서 직접 측정을 하였다.

2.2 HEP(Habitat Evaluation Procedure)의 기본개념

HEP에서 서식지 계량화 방법으로, 서식지의 양은 대상 생물종의 분포 서식지의 면적을 산출함으로써 구할 수 있고, 서식지의 질은 대상 종의 서식 적합 지수(Habitat Suitability Index, HSI)에 의해 계량화할 수 있다. HSI는 각각의 단위 적합 지수(Suitability Index, SI)의 합에 대한 평균으로 구성되며, 최종적으로 HSI model에 서식지의 면적을 곱하여 식 (1)~(3)과 같은 방법으로 단위 서식지(Habitat Unit, HU)를 산출한다. 이 경우, SI는 0.0~1.0 사이의 값을 가지는데, 0.0은 서식 불가능한 곳, 1.0은 이상적인 서식지를 나타낸다. SI는 어떤 종이 서식하기에 필요한 단위 환경과도 같은 것으로서 바다숲 조성용 해조류에는 수온, 염분, 영양염 등과 같은 필수적인 환경 요소들이 각각의 SI가 될 것이다. 따라서 각각의 SI 값으로부터 산출된 HSI값도 0.0~1.0의 값을 지니게 된다.

$$\text{HU(Habitat Unit)} = \text{HSI} \times \text{Study area} \quad (1)$$

$$\text{HSI(Habitat Suitability Index)} = (\text{SI of study area}) / (\text{SI of ideal habitat area}) \quad (2)$$

$$\text{SI(Suitability Index)} = (\text{State of environmental conditions in study area}) / (\text{State of environmental conditions in ideal habitat area}) \quad (3)$$

2.3 보간기법의 선정

본 연구에서는 국지적 공간 인터폴레이션으로서 일반적으로 사용되고 있는 Kriging 방법을 사용하였다. 이 방법은 한 점에서 다른 모든 점들 간의 거리와 속성의 차를 구한 뒤, 이들 두 변수를 축으로 하여 배리오그램(분산도)을 획득할 수 있으며, 이는 일반적으로 점 간의 거리가 가까울수록 속성값의 변이는 작지만, 거리가 증가할수록 속성 변이는 증가하게 된다는 원리로 계산한다[7]. 본 연구에서는 격자 간격 25m의 Ordinary Kriging을 사용하였으며, 분산도는 기울기가 1을 지니는 선형 방법을 사용하였다.

2.4 공간 분포도(Gridded Spatial Distribution Map, GSDM)의 작성 및 중첩

실제 지형 및 수심 자료가 바다숲 적지 선정 분석에 이용되기 위해서는 지형 및 수심 자료를 수치화시킬 필요가 있다. 공간상에 나타나는 지형의 기복을 수치적으로 표현한 자료를 수치 표고 모델(Digital Elevation Model, DEM)이라고 하며, 수치 지형 모델(Digital Terrain Model, DTM)이라고도 한다. 그러나 DTM에서는 지형의 기복뿐만 아니라 지표의 다른 속성도 포함할 수 있기 때문에 더 포괄적인 의미를 지닌다고 할 수 있다[8]. 본 연구에서는 DTM을 바탕으로 바다숲이 조성될 해역에 대한 각각의 단위 적합 지수(SI)의 GSDM을 작성하여 모든 SI의 GSDM을 중첩하였다. 최종적으로 기하 평균 방법을 이용하여 서식 적합 지수(HSI)를 산정함으로써 대상 해조류의 서식 적지에 대한 계량화를 시도하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 해양 환경의 분석

1) 수온

1997~2008의 12년 동안 연구 해역인 바다숲 조성 해역의 표층과 저층 수온에 대한 경년 변화를 분석하였다. 바다숲 조성 해역의 평균 수온은 표층은 16.28℃였으며, 저층은 15.06℃였다. 연중 가장 낮은 수온을 나타내는 때는 2월로서 12년간 평균한 2월 수온은 표층이 11.98℃, 저층이 11.9

3℃로서, 표·저층 간에 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. 이는 동계는 계절풍이 지속적으로 불며, 표면 수온의 냉각으로 인해, 대류 순환이 발생함으로써 수층의 혼합이 발생하여 수온 차이가 없어지게 된 것으로 판단된다. 또한, 거제의 2월 평균 기온이 약 3~4℃인데 반해 수온은 이보다 7~8℃ 정도 높은 분포를 보여 바다숲 조성 해역은 대마난류의 영향을 받고 있음을 추정할 수 있다. 연중 가장 높은 수온을 나타내는 시기는 8월로서, 12년간 평균한 수온은 표층이 22.70℃를 나타냈고, 저층은 17.83℃를 나타내, 표층과 저층 사이의 수온 차가 약 5℃ 발생하고 있는 사실을 확인하였다. 이는 하계에 표층 수온이 상승하여 성층이 발생하였기 때문으로 판단된다.

2) 염분

1997~2008년 동안 바다숲 조성 해역의 표층과 저층의 염분에 대한 경년 변화를 분석하였다. 바다숲 조성 해역의 평균 염분은 표층의 경우, 32.25psu였고, 저층의 경우가 33.57psu 이었다. 연중 가장 낮은 염분을 나타내는 시기는 8월이었으며, 12년간 평균한 8월 염분은 표층이 32.09psu, 저층이 33.04psu로서 저층이 1psu 정도 높았다. 이는 8월은 하계로서 강수량이 많고 수온에 의한 해수의 수직 혼합이 없으므로 고염 저온의 물이 저층에 그대로 머물기 때문인 것으로 판단된다. 연중 가장 높은 염분을 나타내는 시기는 5월로서 12년에 걸친 평균 염분은 표층이 33.68psu, 저층이 33.84psu를 나타내어 표층과 저층 간의 염분 차이는 거의 나타나지 않는 것으로 나타났다. 이는 5월의 경우 일사량 및 해수의 증발량은 증가하지만, 강수량이 상대적으로 적어 염분이 다른 시기보다 높게 나타나는 것으로 판단된다.

3) 수소이온농도(pH)

1997~2008년 동안 바다숲 조성 해역의 표층과 저층의 수소 이온 농도(pH)에 대한 경년변화를 분석하였다. 바다숲 조성 해역의 평균 pH는 표층이 8.10, 저층이 8.08이었다. 측정시기 중 가장 높은 값을 보였던 시기는 2006년 5월이었고, 이때의 pH 값은 8.34였으며, 가장 낮은 값을 나타냈던 시기는 2004년 8월로서 7.63을 나타내었다. pH 값은 수온과 염분처럼 계절별로 일정한 경향을 나타내지 않는 것으로 나타났다.

4) 화학적 산소 요구량(COD)

1997~2008년 동안 바다숲 조성 해역의 표 층과 저층의 화학적 산소 요구량(COD)에 대한 경년 변화를 분석하였다. 바다숲 조성 해역의 평균 COD는 표층이 1.11mg/L였고, 저층이 1.025mg/L였다. 연중 가장 높은 값은 표층의 경우, 대체로 8월에 나타났으며, 저층은 표층과 유사한 변동을 나타냈으나, 표층처럼 특정한 계절에 높게 나타나지는 않았다.

5) 암모니아 질소(NH4+-N)

1997~2008년 동안 바다숲 조성 해역의 표층과 저층의 암모니아 질소(NH_4^+-N)에 대한 경년 변화를 분석하였다. 바다숲 조성 해역의 평균 NH_4^+-N은 표층이 0.022mg/L이었고, 저층이 0.018mg/L로서 0.004mg/L 정도로 표층이 더 높았다. 표·저층 모두 특정한 계절에 간헐적으로 특이하게 높게 나타나는 경향은 있었으나, 계절적 변화에 영향을 받는 변동은 관찰되지 않았다.

6) 용존 무기인(DIP)

1997~2008년 동안 바다숲 조성 해역의 표층과 저층의 용존 무기인(DIP)에 대한 경년 변화를 분석하였다. 바다숲 조성 해역의 평균 DIP는 표층이 0.018mg/L이었고, 저층이 0.025mg/L로서 저층이 0.007mg/L 더 높았다. 표·저층 모두 특정한 계절에 간헐적으로 특이하게 높게 나타나는 경향은 있었으나, 계절적 변화에 영향을 받는 변동은 관찰되지 않았다.

7) 용존 무기질소(DIN)

1997~2008년 동안 바다숲 조성 해역의 표층과 저층의 용존 무기인(DIP)에 대한 경년 변화를 분석하였다. 바다숲 조성 해역의 평균 DIP는 표층이 0.018mg/L이었고, 저층이 0.0105mg/L로서 0.0075mg/L 정도로 표층이 더 높았다. 표·저층 모두 특정한 계절에 간헐적으로 특이하게 높게 나타나는 경향은 있었으나, 계절적 변화에 영향을 받

는 변동은 관찰되지 않았다.

3.2 해조류의 서식 및 생장에 관련된 적정 해양 환경의 범위

해조류의 생장과 관련된 해양 환경의 적정 범위를 Table 1에 나타내었다. Suto[9]는 바다숲 시설의 대상이 되는 주요 갈조류에 대해서 동절기 및 하절기의 한계 수온과 염분, COD 및 입사 파고와의 관계를 다시마, 미역, 감태, 모자반류 등의 온대성 해조류의 생장과 어떠한 관계에 있는지를 구명하였다.

일반적으로 연중 가장 낮은 수온을 나타내는 2월의 수온에 따른 주요 갈조류의 생장 범위를 살펴보면, 다시마는 -1°C~8°C, 미역은 2°C~14°C로서 다른 주요 대상 해조류보다 낮은 수온에서도 서식할 수 있음을 알 수 있다. 8월의 수온 범위에 따른 해조류의 서식 범위 역시 다시마와 미역이 20~24°C, 20~27°C로, 다른 주요 갈조류보다 낮은 수온에서 서식이 가능했다. 염분의 경우 미역이 23.7psu, 괭생이모자반이 26.6psu으로 비교적 낮은 염분에서도 서식할 수 있었으며, 다른 대상 종들은 대부분 30.0psu 이상의 염분에서 서식 가능한 것으로 나타났다. COD와 해조류와의 서식 관계를 살펴본 결과, 미역과 괭생이모자반이 COD 농도가 각각 2.2mg/L까지는 서식할 수 있어 오염에 비교적 강한 종으로 나타났으며, 다른 대상 종들은 대부분 1.5mg/L 이하에서 서식할 수 있는 것으로 나타났다. 해조류의 서식은 파랑과도 밀접한 관계가 있는데, 감태와 큰잎모자반은 입사 파고가 각각 6m와 4m인 비교적 파랑이 큰 해역에서도 서식할 수 있는 것으로 판단되며, 나머지 종들은 대략 입사 파고가 1~2.5m의 범위 내로 나타났다.

Seki 등[10]은 해수의 알칼리 정도의 여부와 해조류의 서식관계에 대하여 구명하였는데, 일반적으로 수산 자원 조성용 기질로 투여되는 인공어초 및 해중림초와 같은 시멘트 구조물은 과다한 알칼리 성분을 방출할 때 해조류의 착생이 저해된다는 사실을 밝혔다. 그 결과에 따르면 pH가 8.9 이상이

Table 1: Relationship between major brown algae and their habitat's environmental factors

Species	Major habitat environmental factors							
	Feb. water temp.* (°C)	Aug. water temp.* (°C)	Sal.* (psu)	pH**	COD* (mg/L)	NH_4-N*** (μmol/L)	DIN*** (μmol/L)	Wave height* (m)
Laminaria japonica	-1~8	20~24	-	〈 8.9	-	0.0~7.0	0.1~26.0	2.5
Undaria pinnatifida	2~14	20~27	〉23.7	〃	〈 2.2	3~7.5	2~18.0	1.8
Eisenia bicyclis	7~14	22~27	〉30.0	〃	〈 1.6	0.0~2.7	0.50~8.96	2.5
Ecklonia cava Kjellman	10~16	23~27	〉30.9	〃	〈 1.3	0.07~9.3	0.36~13.20	6.0
E. kurome Okamura.	8~14	26~27	〉31.8	〃	〈 1.4	0.0~8.92	0.32~12.06	2.1
S. horneri (Turner) C.	4~19	20~28	〉26.6	〃	〈 2.2	0.17~4.6	0.30~7.85	1.0
S. patens C.Agardh.	6~20	24~28	〉29.8	〃	〈 1.3	1.39	2.20	1.0
S. ringgoldianum Harvey ssp.	7~16	22~27	〉30.9	〃	〈 1.3	0.42	3.68	4.0
Study area	11.93~11.98	17.83~22.70	32.25~33.57	8.08~8.10	1.03~1.10	1.29~1.57	0.64~0.89	3~6

*, ** and *** were referred from [9], [10], [11].

될 때에는 해조류가 서식하기 어렵다는 사실을 관찰하였다. 따라서 바다숲을 조성하기 위해서는 해역의 pH가 8.9 이하가 되어야 할 것으로 판단된다. 또한, 일본수산자원보호협회[11]은 각종 영양염과 주요 갈조류에 대한 해조류의 서식 관계를 구명하였는데, 단위가 μ mol/L로서 매우 미량의 영양염으로도 주요 갈조류들은 서식할 수 있음을 보여 주었다.

이상의 결과를 종합해 보면, pH, COD 및 영양염 등은 연구 해역 전역에 걸쳐 크게 차이가 나지 않으므로 Table 1에 열거된 해조류의 서식에 있어서는 큰 영향을 미치지는 않을 것으로 판단되며, 동·하절기의 수온 및 평균 염분, 광량 및 파랑의 분포에 따라 해조류의 서식 양상은 크게 달라질 것으로 판단된다. 본 바다숲 조성 해역의 경우, 전술한 수질 환경의 분석 결과를 보면, 동·하절기의 수온 및 파고의 분포를 제외한 모든 수질 환경 조건이 바다숲 시설의 대상이 되는 다시마, 미역, 감태, 모자반류 등의 주요 갈조류가 서식함에 있어 적합한 조건을 만족하고 있는 것으로 분석되었다. 바다숲 조성 해역의 2월 평균 수온은 12°C였으며, 8월 평균 수온은 22.5°C였다. 이 결과에 의하면, 바다숲 조성 시, 다시마는 동계의 수온 범위를 만족하지 못하고 있으며, 검둥감태와 쌍발이모자반은 하계의 수온 범위를 만족하지 못하고 있다. 따라서 수질 환경과 해조류의 생태를 고려하여 연구 해역에 바다숲을 조성하기 위한 갈조류를 선정할 경우, 대상 종으로서 미역과 검둥감태 그리고 쌍발이모자반은 제외하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 그러므로 바다숲 조성 해역의 파랑을 분석한 후 파랑과 갈조류의 서식관계를 구명하여 대상 종을 선정하면, 바다숲을 조성하는 데 있어서 효과가 더욱 향상 될 수 있을 것으로 생각된다.

3.3 HSI model 구축을 위한 대상종 선정

HSI model은 다수의 단위 적합 지수인 SI(Sutability Index)의 조합으로 이루어진다. 바다숲이 성립되기 위한 중요한 인자로서, 해조의 서식에 절대적인 영향을 줄 것으로 판단되는 인자는 SI로 구성된다. 예를 들면 SI는 수온, 염분 영양염 및 광량 등의 수질 환경적 특성과 파고 등의 유체역학적 특성, 지질 및 퇴적물 양상 등의 지반학적 특성 등으로 세분화해서 나타낼 수 있다. 각각의 SI는 0~1.0까지의 값을 가지며 기하 평균 및 산술 평균을 이용하여 결합하나 기하 평균은 각각의 자료 값을 곱으로 결합하는 특성상 여러 가지 SI값 중 하나라도 0값을 가지면 전체의 값이 0이 되기 때문에 산술평균보다 엄격하게 현상을 반영한다[12]. 따라서 본 연구에서는 기하 평균을 이용하여 각각의 SI를 결합하였다.

바다숲을 조성하기 위해서는 우선 대상 종을 선택해야 한다. Table 1에 따르면, 연구 해역인 바다숲 조성 해역은 2월의 수온이 11°C 이상이며 8월의 수온이 23°C로서 온대성 해역이므로 한대성 해조류인 다시마와 24°C 이상의 고수온에서 잘 성장하는 검둥감태와 쌍발이 모자반 등은 제외하는 것이 타당할 것으로 판단되었다. 또한, 현장 조사 결과 연구 해역에서 대부분 해조류가 서식하고 있는 수심대는 15m보다 얕은 수심이었으며, 이때의 입사 파고는 5m 이상일 것으로 판단되므로 파랑에 강한 종이 적합할 것으로 사료된다. 높은 파랑에서 성장할 수 있는 종으로서는 큰잎모자반과 감태가 있으며, 이들 종은 입사 파고 4.0m, 6.0m의 파랑이 강한 해역에서 잘 성장하므로 바다숲 조성 해역에서 대상 해조류로서 감태(*Ecklonia cava Kjellman*)를 선정하였으며, 이는 본 바다숲 조성 해역에 수질 환경적 조건뿐만 아니라 유체 역학적 특성도 만족하게 해 바다숲을 조성하기에 가장 적합할 것으로 사료된다. 따라서, 본 연구에서는 바다숲 대상 종으로서 감태를 대상으로 하여 HSI model을 작성하였다.

3.4 HSI model의 작성

감태의 HSI model을 작성하기 위하여 감태 서식에 필수적인 환경 요소들과 거기에 따른 각각의 변수를 지정하였다[12]. 감태 서식에 필수적인 항목은 부착 기반, 수온(2월과 8월), 광 조건, 파랑, 수질(염분 및 COD) 등의 총 7개로 가정하였다. 이러한 7개의 요소는 상호작용하며 감태의 서식에 영향을 줄 것으로 생각하여 SI_1~SI_7까지 해당 항

목당 1개씩 변수를 주었다. 각각의 SI에 대한 점수의 차등은 식 (4)의 1차 함수 형태의 선형 보간을 통하여 부여하였다.

$$SI_i = a + bx \quad (4)$$

여기서, SI_i는 각각의 환경 변수에 대한 SI이며, a는 각각의 SI에 대한 최소값 및 최대값, b는 각각의 SI에 대한 1차 함수의 기울기이다.

Table 2: Conditions and relevant variables needed for survival of *Ecklonia cava Kjellman*

Model	Conditions for survival	Variables
HSI	Epiphytic base	SI_1
	Water temperature(Feb.)	SI_2
	Water temperature(Aug.)	SI_3
	Light	SI_4
	Wave height	SI_5
	Salinity	SI_6
	COD	SI_7

1) 착생 기반 (SI_1)

착생 기반은 해조류가 부착할 수 있는 기반이다. 기반 시설은 해조류가 견고하게 부착하여 서식 공간을 마련하는 곳으로 해조류의 생태에 있어 매우 중요한 역할을 하고 있다. 감태는 일반적으로 암반 내지는 50cm 이상의 전석에 대부분 분포하며, 12~25cm의 자갈에는 약 10% 정도만이 부착하는 것으로 알려져 있다[13]. 따라서 50cm 이상의 전석에는 SI_1을 1.0으로 부여하고, 12cm 이하의 전석을 0.0으로 하여 식 (4)를 적용하여 각 단계에서의 SI_1을 구할 수 있다(**Figure 2(A)**). 그러나 본 연구에서는 바다숲을 조성하기 위해 해조의 착생에 가장 최적화된 인공 기반인 해중림초를 설치하기 때문에 바다숲 조성 해역의 전 영역에 걸쳐 SI_1=1.0을 부여하였다.

2) 수온 (SI_2, SI_3)

① 2월 평균 수온 (SI_2)

Table 1에 따르면, 2월에 감태가 서식하기에 적정한 수온 범위는 10~16°C이다. 따라서, 10~16°C를 SI_2값으로 1을 부여하였다. 연 구 해역의 2월 평균 수온에 대한 12년간의 표본표준편차는 0.82로 나타났으며, 표준편차에 1.96(95% 신뢰 수준)을 곱하여 서식 적정 범위의 하한 값에는 1.6을 감하고 상한 값에는 1.6을 더함으로서 감태의 서식 상한 및 하한 값은 각각 8.4°C 및 17.6°C로 설정되었다. 따라서 1 이외의 SI_2값은 식 (4)의 1차 함수 값을 이용하여 계산할 수 있다(**Figure 2(B)**). 바다숲 조성 해역의 2월 평균 수온은 11°C이므로 SI_2=1을 적용할 수 있다.

② 8월 평균 수온 (SI_3)

Table 1에 따르면, 8월에 감태가 서식하기 가장 적정한 수온범위는 23~27°C이다. 따라서 23~27°C를 SI_3값으로 1을 부여하였다. 연구 해역의 8월 평균 수온에 대한 12년간의 표본 표준 편차는 1.95로 나타났으며, 표준 편차에 1.96을 곱하여 8월의 수온에 대한 감태의 서식 하한과 상한을 19.18°C 및 30.82°C로 각각 설정하였다. 따라서 1 이외의 SI_3값은 식 (4)의 1차 함수 값을 이용하여 계산할 수 있다(**Figure 2(C)**). 바다숲 조성 해역의 8월 평균 수온은 23°C이므로 SI_3=1을 적용할 수 있다.

3) 광 조건으로 인한 수심 (SI_4)

Maegawa 등[14]은 투명원판을 이용한 투명도를 측정함으로써 감태의 광합성 한계 광량 조건을 제시한 바 있다. Maegawa 등의 결과에 따르면 감태는 광합성을 하기 위해 투명도가 4m 이상이 되어야 하며, 대형 갈조류가 무성한 시기인 3월에 측정한 바다숲 조성 해역의 투명도는 5.5m로 나타나 감태가 광합성을 하기에는 무리가 없는 것으로 판단된다. Terawaki 등[15]은 투명도 5m인 곳에서의 수심별 감태 서식량을 조사한 결과, 5~15m대에서 감태가 가장 잘 서식하였음을 밝혔다. 광량은 수심이 깊어짐에 따라 감소하며, 광량의 부족은 해조류의 성장을 저해하므로 SI_4값을

5m부터 15m까지 1차 함수적으로 감소하는 것으로 설정하였다. 따라서, 수심 5m를 SI_4=1.0으로 하였을 때, 식 (4)를 이용하면, 수심 10m에서의 SI_4 값은 0.5이며 수심 15m에서의 SI_4값은 0.0을 적용할 수 있다(**Figure 2(D)**).

4) 파랑 (SI_5)

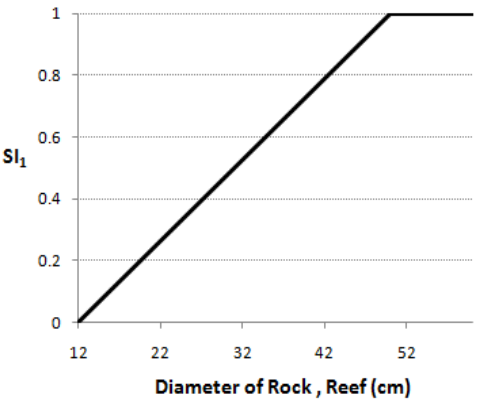
Konno 등[13]은 파랑이 거의 없는 곳에서는 감태의 서식률이 0%에 가까워진다는 사실을 밝혔다. 따라서, 감태는 파랑이 강한 곳에서 서식하기 적합한 종임을 알 수 있다. **Table 1**에 따르면 감태가 주로 서식하고 있는 해역의 입사 파고는 6m이다. 따라서 6m를 기준으로 하고, 식 (4)를 사용하면, 입사 파고가 5m, 4m, 3m, 2m, 1m, 0m인 경우의 SI_5는 각각 0.83, 0.67, 0.50, 0.30, 0.17, 0.0으로 산정할 수 있으며, 입사 파고가 7m, 8m, 9m, 10m, 11m, 12m 이상인 경우의 SI_5는 각각 0.83, 0.67, 0.50, 0.30, 0.17, 0.0을 적용할 수 있다(**Figure 2(E)**). 본 바다숲 조성 해역은 오[16]의 연구 결과에 따르면, 연구 해역의 수심 15m에서의 입사 파고는 6m였으며, 수심 10m에서는 4.5m, 수심 5m에서는 3m였다. 따라서, SI_5는 각각 1.0, 0.75, 0.50을 적용할 수 있다.

5) 염분 (SI_6)

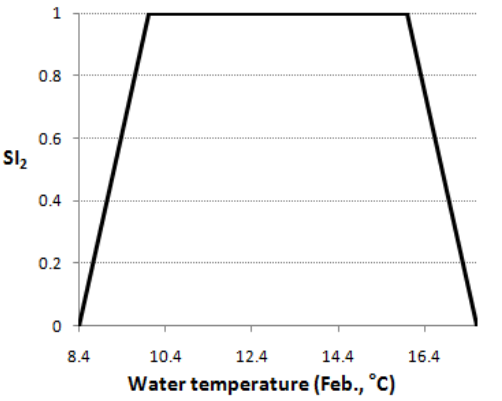
Table 1에 따르면, 감태가 서식할 수 있는 평균 염분 농도는 30.9psu 이상만 되면 염분의 농도에 관계없이 성장할 수 있다. 따라서 30.9psu 이상은 SI_6=1.0을 부여하였다. 연구 해역의 염분에 대한 12년간의 표본 표준 편차는 0.79로 나타났으며, 표준 편차에 1.96을 곱하여 염분에 대한 감태의 서식 하한을 29.35로 설정하였다. 따라서 1 이외의 SI_6값은 식 (4)의 1차 함수 값을 이용하여 계산할 수 있다(**Figure 2(F)**). 바다숲 조성 해역의 평균 염분은 32.91psu이므로 SI_3=1을 적용할 수 있다.

6) COD (SI_7)

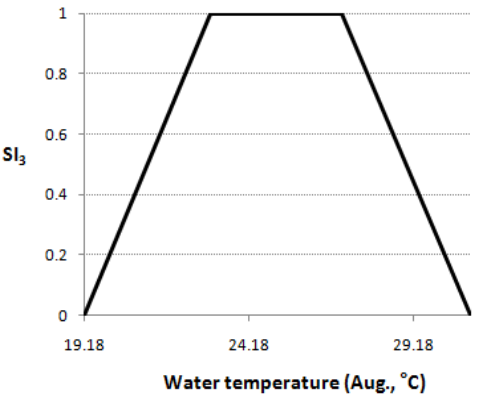
Table 1에 따르면 감태가 서식할 수 있는 COD 농도는 1.3mg/L 이하이면, COD의 농도에 관계없이 성장할 수 있다. 따라서 1.3mg/L 이하는 SI_7=1.0을 부여하였다. 연구 해역의 COD에 대한 12년간의 표본 표준 편차는 0.52로 나타났으



(A) SI_1 value (Rocks or Reefs condition).



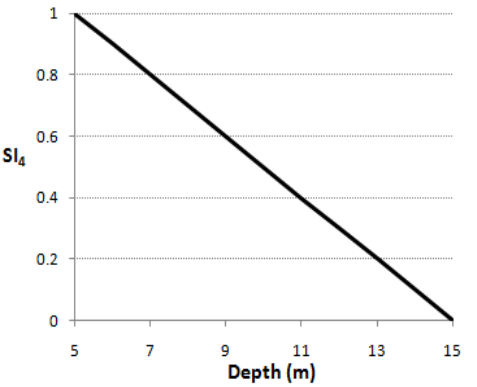
(B) SI_2 value (Feb. water temperature condition).



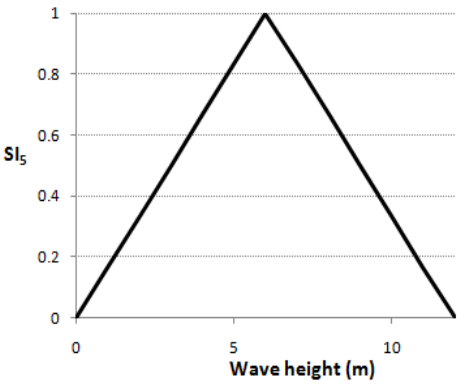
(C) SI_3 value (Aug. water temperature condition).

Figure 2: Variable diagrams of SI1-SI7 values.

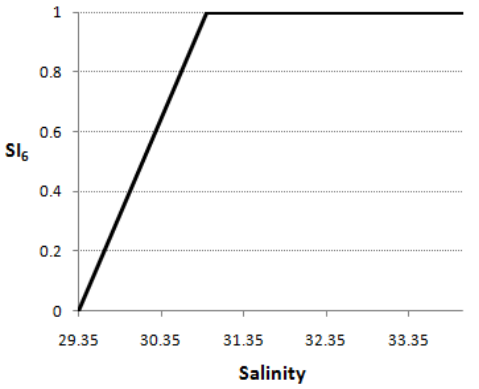
며, 표준 편차에 1.96을 곱하여 COD에 대한 상한을 2.32mg/L로 설정하였다. 따라서 1 이외의 SI_7 값은 식 (4)의 1차 함수 값을 이용하여 계산할 수 있다(Figure 2(G)). 바다숲 조성 해역의 평균 COD는 1.07mg/L이므로 SI_7=1을 적용할 수 있다.



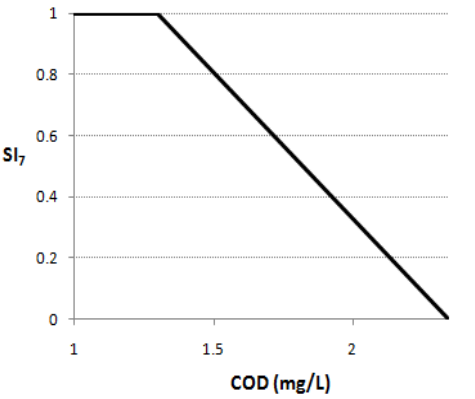
(D) SI_4 value (Light condition).



(E) SI_5 value (Wave condition).



(F) SI_6 value (Salinity condition).



(G) SI_7 value (COD condition).

Figure 2: Continued.

3.4 SI에 대한 결합 및 중첩

본 연구에서는 앞서서 밝혔듯이 기하 평균을 이용하여 SI를 결합하였으며, 기하 평균을 이용한 SI의 결합 식은 식 (5)와 같다.

$$HSI = \sqrt[7]{SI_1 \times SI_2 \times SI_3 \times SI_4 \times SI_5 \times SI_6 \times SI_7} \quad (5)$$

여기서, SI_i는 대상 종이 서식함에 있어 필수적인 요소들에 대한 변수이다.

각각의 생존 필수 요건들에 대한 GSDM을 작성한 후, 식 (5)를 이용하여 각각의 변수들을 결합하였고, 다시 이들을 중첩하여 감태를 이용한 바다숲 조성에 생태적으로 가장 유리한 최적의 적지는 Figure 3과 같이 분석되었다.

바다숲 조성 해역의 HSI를 분석한 결과, HSI 값을 지니고 있는 영역에서 최저치는 0.55였으며, 최고치는 0.907로 분석되었다. HSI가 0.90이상인 영역은 저질이 암반 및 자갈 질로 구성이 되어 있으며, 수심이 5~7m 사이에 분포하고 있다. 이는 1.0이 HSI의 최고치이므로 본 바다숲 조성 해역에 감태를 이식할 경우 서식 적합성이 100%를 기준으로 하였을 때, 90%의 적합성을 지닌다는 것을 의미한다.

수심범위가 5~7m의 사이에서 HSI가 높게 나온 이유는 다음과 같이 생각된다. 수온, 염분, COD 등의 수질 환경적 요소는 전 수심 대에 걸쳐 거의 일정하다고 하였을 때, HSI를 변동시키는 결

정적 요인은 수심의 분포에 따라 변동하는 요소인 광 조건과 파랑의 조건이 된다. 따라서 최고치의 HSI를 지닌 수심 대는 광 조건과 입사 파고의 분포에 대한 감태의 서식 조건이 다른 수심 대보다 양호한 조건이기 때문으로 사료된다. 그리고 수심 5m 이하와 15m 이상은 감태가 생육할 수 있는 한계 수심을 벗어나 있으므로, HSI가 0.0이 되어 적지에서 제외되었다. 따라서 바다숲을 조성하기 위하여 인공적인 기반을 투여할 경우, 대상 종이 서식하는 데 있어 최적의 수심 대를 파악하는 것이 무엇보다도 중요하며, 수심이 변화하는 방향으로 수직적 대상 형태의 시설보다 등 수심 선을 따라 수평적 대상형태로 시설하는 것이 바다숲 조성에 보다 효과가 좋을 것으로 판단된다. 또한 HSI를 자세히 분석하여 수심이 깊어서 광 조건이 충분치 못하여 HSI가 낮아진 경우는 해중림초 같은 기반 시설의 높이를 증가시키는 방법 등도 고려될 수 있으며, 수심이 얕아 HSI의 값이 작아진 곳은 피복석같이 구조물의 높이가 낮은 것이 더욱 효율적일 것으로 생각된다.

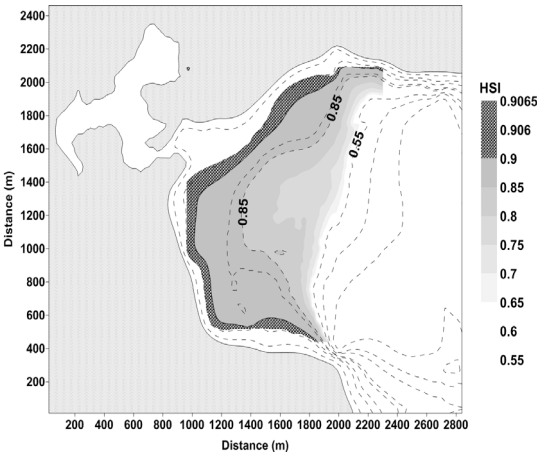


Figure 3: Gridded Spatial Distribution Map (GSDM) of Habitat Suitability Index (HSI) overlaid by each suitability index(SI) for *Ecklonia cava Kjellman*.

바다숲 조성시 최적의 효율을 나타낼 것으로 판단되는 HSI 값 0.90이상인 해역의 면적은 총 18ha로 분석되었다. 식 (1)~(3)을 사용하여 HU를 계산한 결과, 16.2로 나타났다. 하지만, 본 바다숲 조성 해역에 다른 종을 도입하였을 때는 대상 종에 따라 요구되는 환경 조건도 달라지므로 HU는 다르게 산출될 수 있다. 따라서 최종적으로 최고의 HU값이 나오도록 적지를 도출할 것이 요구된다. 한편, 본 연구에서는 기하 평균으로 HSI를 결합하였는데, 기하평균의 특징으로서는 각각의 SI들이 곱의 형식으로 구성되어 있기 때문에, SI 중 어느 하나라도 0 값을 지니면 HSI가 0이 되는 성질을 지니고 있다. 이는 대상 종이 서식하기 위해서는 필수 조건 중 어느 한 조건이라도 결핍되어서는 안 된다는 가정을 전제로 하고 있기 때문으로 현상을 산술 평균보다 엄격하게 반영하고 있음을 알 수 있다. 또한, 본 연구에서는 동일 변수에서의 SI 값을 1차 함수 형태의 선형적인 보간을 통해 차등을 부여하였다. 그러나 SI에 대한 연구를 다른 각도에서 수행할 필요가 있으며, 여러 가지 보간법을 통한 보다 합리적인 SI등급의 책정은 정밀한 적지의 분석에 있어 필수적인 요소인 것으로 사료된다.

4. 결 론

생태적 관점에서의 적지 판정을 시도하기 위하여 HSI model을 이용하여 감태(*Ecklonia cava Kjellman*)를 대상으로, 바다숲 조성 해역의 대상 적지를 판정하였다. HSI model을 작성하기 위하여 감태의 서식에 필수적으로 필요한 7가지 항목을 각각의 변수로서SI_1~SI_7까지 가정하여 기하 평균으로 결합하였다. 그 결과 도출된 적지는 수심 5~7m대에 수평적인 대상 분포의 형태로 나타났다. 이는 수온, 염분, COD는 수심의 변화에 크게 영향을 받지 않는 데 반해, 광 조건과 파랑의 강도는 수심에 따라 많은 영향을 받기 때문으로 분석되었다. 그러므로 바다숲을 성공적으로 수행하기 위해서는 해조류에 영향을 미치는 여러 환경 인자들의 정확한 분석이 무엇보다도 중요할 것으로 사료된다.

본 연구에서는 서식지의 질을 계량적으로 표현하기 위해서 감태에 대한 HSI model을 작성하였다. 보다 정확한 바다숲 조성 해역의 적지 분석을 위하여 각각 물리 및 수질 환경에 대한 SI를 다른 각도

에서도 매우 면밀하게 분석할 필요가 있다. 또한, 적지 선정에 있어 오류를 최소화 하기위해서는 학제간의 연구도 반드시 필요할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 논외로 하였으나, 수산 자원 조성용 시설물의 항구적인 기능을 유지하기 위해 파랑 등의 유체력과 해저의 지반력과의 관계를 고찰하는 것도 매우 중요하다. 따라서, 본 연구에서 제시된 HEP방법과 시설물의 안정성에 대한 적지를 통합하여 분석하면 대상 해조류의 서식 안정성은 물론 시설물의 안정성도 동시에 확보할 수 있는 적지가 도출될 수 있을 것으로 판단된다.

5. 참고문헌

[1] 조명희, 김병석, 서영상, "위성원격탐사자료와 GIS를 이용한 인공어초 시설지 적지선정 공간분포도 작성 연구, 한국원격탐사학회, vol. 17, no. 1, pp. 99-109, 2001.

[2] Nakajima, Y., "On the technique for selection of suitable site of creation on seaweed bed", The Japanese Society of Fisheries Engineering, vol. 42, no.2, pp. 159-163, 2005, (in Japanese).

[3] 오태건 외 4인 "바다숲 조성 해역의 물리적 환경을 고려한 최적 적지선정", 한국마린엔지니어링학회지, vol. 34, no. 1, pp. 183-194, 2010.

[4] Ishigaya, T., "A task of habitat evaluation procedure(HEP) and establish of HSI model", Japanese Society of Environmental Entomology and Zoology, 14th Conference on fauna survey methods (Environmental assessment), pp. 33-54, 2004 (in Japanese).

[5] 김평주, 진해만의 해양환경이 적조발생에 미치는 영향, 전남대학교 석사학위논문, pp. 14-17, 2007.

[6] 해양수산부, 해양환경공정시험법, p. 317, 1998.

[7] 신정엽, 이상일, GIS의 개념과 원리, 다락방, pp. 1-14, 2003.

[8] 김윤영, "인삼정보시스템 구축 및 이를 활용한 재배적지 분석(금산지역)", 고려인삼학회지, vol. 26, no. 1, pp. 24-30, 2002.

[9] Suto, S., "A trial to relate marine benthic floras more precisely to their environmental conditions", Jpn. J. Phycol. 40, pp. 289-305, 1992. (in Japanese).

[10] Seki, S., Zen, I., Abe, T., Hukuzawa, T., "A experimental study on sea water mixed by concrete ash", The reports of harbor technique and research institute, vol. 14, no. 4, pp. 113-132, 1975 (in Japanese).

[11] JFRCA, A standard of judgement and a case for understanding ocean environments impact on algae, pp. 38-47, 1992.

[12] Matsumoto, T., Yamaguchi, T., Habitat Suitability Index Model (Kajime), 14p, 2006. (in Japanese.)

[13] Konno, T., "Vegetation component of *Sargassum confusum* and *Ecklonia cava* bed", Ocean Science, vol. 17, no. 1, pp. 57-65, 1985 (in Japanese).

[14] Maegawa, M., Kurihuji, K., "Effect of muddy water in coastal marine forests eco-system", Bulletin of the Japaneses Society of Fisheries Oceanography, vol. 65, no. 4, pp. 166-168, 2001 (in Japanese).

[15] Terawaki, T., Kawasaki, Y., Honda, M., Yamada, S., Maruyama, K., Igarashi, Y., Verification of technologies for kelp forest creation on sandy sea beds. II Ecology and growing characteristics of *Eisenia bicyclis* and *Ecklonia cava* at western sea coast of Miura peninsular, central Japan, The reports of Abico Research

Lab. (Central Research Institute of Electronic Power Industry), no. U91022, 66p, 1991 (in Japanese).
[16] 오태건, 바다숲 조성을 위한 적지선정기법에 관한 연구, 전남대학교 박사학위논문, pp. 78-80, 2010.

저 자 소 개

오태건 (吳兌建)
여수대학교 해양토목공학과졸업, 전남대학교 해양공학과(공학박사), 2004년~현재 국립수산과학원 자원조성사업단, 관심분야 : 수산토목기술에 의한 수산자원조성

김이청 (金利淸)
부산수산대학교 졸업, 부경대학교 대학원 졸업(이학박사), 1983. 1~현재 국립수산과학원 자원조성사업단, 관심분야 : 수산자원 조성

양용수 (梁龍水)
제주대학교 대학원(석사, 수산학 박사), 1992. 5~현재 국립수산과학원 자원조성사업단, 관심분야 : 자원관리형 어업기술

김창길 (金昌吉)
동아대학교 대학원 졸업(공학석사), 일본 동북대학교 대학원 졸업(토목공학전공, 공학박사), 1976년~현재 국립수산과학원 전략연구단, 관심분야 : 인공어초에 의한 자원조성.

이문옥 (李文沃)
부산수산대학교 졸업, 오사카대학교 대학원 졸업(공학박사), 1983년~현재 전남대학교 해양기술학부 (교수)재직, 관심분야 : 환경수리학 및 해양생태환경복원기술