

서식지 평가법(HEP)과 3D 공간보간법(Kriging)을 이용한 제주도 바다숲 입지적합성 평가

이진형* · 김영호**

Location Suitability Assessment on Marine Afforestation Using Habitat Evaluation Procedure(HEP) and 3D kriging: A Case Study on Jeju, Korea

Jinhyung Lee* · Youngho Kim**

요약 : 바다사막화 현상인 갯녹음이 심화됨에 따라, 바다숲 조성사업이 추진되고 있다. 그러나 조성지 선정과정은 행정적 편의성에 초점이 맞춰져 있으며, 입지적합성 분석 연구도 그 중요성에 비해 매우 제한적인 실정이다. 이에 본 연구는 생태학적 요구치, 해저지형, 인문·사회환경 등을 종합적으로 고려한 합리적인 바다숲 입지적합성 평가모델을 제안한다. 연구지역인 제주도는 우리나라에서 갯녹음 현상이 최초로 발견되었으며, 최근에는 연안 전역으로 확대되고 있기에 바다숲 조성이 우선적으로 필요한 곳이다. 서식지 평가법(HEP), 3D 공간보간법(kriging) 그리고 계층적 의사결정 과정(AHP)이 연구방법으로 활용되었다. 특히 해양공간의 특성을 반영하는 3차원 공간분석을 실시하여, 기존의 연구보다 현실적인 분석을 도모하였다. 분석결과, 조천연안이 서귀포·표선연안에 비해 입지적합성이 높은 것으로 평가되었다. 조천연안은 최대 61%의 감태 서식적합도를 나타냈으며, 해저지형 조건을 충족하였고, 인문·사회환경 기준에서도 우수한 평가를 받았다. 본 연구결과는 재정적으로 효율적인 바다숲 입지선정을 가능케 하고, 합리적인 입지를 통한 연안 생태계 복원 및 어촌계 활성화에 도움을 줄 것으로 기대한다.

주요어 : 바다숲, 입지적합성, 서식지 평가법(HEP), 3D 크리깅, 계층적 의사결정 과정(AHP)

Abstract : As marine desertification and chlorosis in Korean coast have been intensified over time, Korean government is promoting marine afforestation projects. However, marine afforestation location is mainly decided by administrative convenience. Also, there is limited literature on location suitability about the marine afforestation. This study aims to assess location suitability of marine afforestation considering 3 significant criteria: ecological, submarine topographical, and human-social environment. Jeju, the study area of this study, first observed chlorosis in Korean coast at the small fishery town in Seogwipo. Jeju is currently suffering from chlorosis all around the island. Habitat Evaluation Procedure (HEP), 3D kriging, Analytic Hierarchy Process (AHP) is applied as analysis methods. Especially, 3D kriging is utilized for modeling 3D ocean space reflecting ocean environment appropriately. The result shows that Jocheon coast has better location suitability than Seogwipo · Pyoseon coast. Jocheon coast has the maximum 61%

* 고려대학교 지리학과 대학원 석사과정(Master Student, Department of Geography, Korea University, jinhyunglee@korea.ac.kr)

** 고려대학교 지리교육과 부교수(Associate Professor, Department of Geography Education, Korea University, younghokim@korea.ac.kr)

suitability as the habitat of *Ecklonia cava* Kjellman, and is highly evaluated in other criteria. The results of this study are expected to find optimal marine afforestation location, and to contribute to the restoration of the Jeju coastal ecosystem and the revitalization of Jeju fishing village societies.

Key Words : Marine afforestation, Location suitability, Habitat Evaluation Procedure (HEP), Analytic Hierarchy Process (AHP)

1. 서론

바다숲은 중요하다. 바다숲은 생태계의 1차 생산자 역할을 담당하고, 해양생물의 서식처 및 산란처로 활용되며, 해양생태계의 복원 및 균형유지와 같은 환경보전기능을 수행한다(김대권 등, 2011). 바다숲은 어촌민들에게 생활의 터전이기도 하다. 제주도 등지의 해녀들은 바다숲의 해조류와 해양생물 채집을 통해 생계를 유지한다. 한편 바다숲은 정부차원에서도 주목 받고 있다. 해조류에서 추출되는 바이오에탄올은 바이오매스 에너지 발전의 주요 공급원으로 이용된다. 바다숲의 이산화탄소 흡수량은 열대우림의 약 5배에 이른다. 따라서 장기적으로 지속 가능한 녹색성장을 위한 이산화탄소 흡수원으로도 각광받고 있다.

그러나 지구온난화에 따른 수온상승, 해양오염 증가, 과도한 양식, 조식성 동물의 과도한 해조류 섭취 등 다양한 요인들로 인해 바다숲이 급격히 파괴되고 있다. 기존의 해조류가 사라지고 하얀 석회조류¹⁾가 연안을 뒤덮으면서 백화현상이 발생하는데, 이를 다른 말로 갯녹음 현상이라고 한다. 우리나라 연안의 갯녹음 피해면적은 급격히 확산되고 있다. 2004년에는 7,000ha였던 갯녹음 피해면적이 2012년에는 16,000ha로 약 220% 증가했다. 해마다 늘어나는 갯녹음 면적은 여의도 면적의 약 4배에 이르는 1,200ha이다. 이러한 바다사막화는 어촌민의 경제적 피해와 직결된다. 정상적인 어장과 비교할 때, 갯녹음 발생 어장에서는 약

40%의 어획감소량이 발생하며 이를 경제적 가치로 환산하면 연간 약 650억원의 피해를 유발하는 것으로 추정된다(노용식·이희연, 2012; 정준호·김광배, 2012; 서울신문, 2013. 8).

우리나라 정부에서는 2009년부터 바다숲 조성 사업을 시행하고 있다. 그러나 2012년까지 조성된 연평균 바다숲 면적은 487ha로 신규 발생면적의 절반에도 못 미치고 있는 실정이다(서울신문, 2013. 8). 또한 바다숲 조성지 선정과정도 주관성 및 행정적 편의성에 초점을 맞추고 있는 것이 사실이다. 바다숲 조성사업 시행지침(농림수산식품부, 2010)을 검토해보면, 객관성에 기초한 입지적합성 분석은 매우 조약하게 이루어지고 있다. 한편 지역 어업인 호응도, 지역 지자체 호응도 등 주관적이고 분석 편의성이 높은 요소들이 주요하게 고려되고 있다. 결과적으로 시·도지사의 추천수역, 단순히 어촌민 호응도가 높은 수역 등이 바다숲 입지적합성이 높은 것으로 평가된다. 정부는 앞으로도 2020년까지 전국연안에 바다숲을 15,000ha, 2030년까지 35,000ha 조성할 계획이다. 하지만 현재의 행정적 편의성 중심의 입지적합성 평가로는 바다숲 조성사업의 성공을 담보할 수 없다. 데이터에 기반한 합리적인 바다숲 입지적합성 분석이 절실히 요구되는 이유이다.

바다숲 입지적합성 분석 연구는 그 중요성에 비하여 매우 미미한 수준이다. 국내 바다숲 입지적합성 분석 연구는 인공어초시설 입지적합성 분석 연구에서 유래한다. 조명희 등(2001)은 위성영상과 지리정보시스템을 이용하여 인공어초시설 적

지를 분석하였다. 그러나 적지분석과정이 벡터데이터에 기반한 단순한 중첩분석(overlay analysis)이라는 한계를 가진다. 이후 래스터분석에 기초한 바다숲 입지적합성 분석 연구로서 오태건 등(2010)은 바다숲 조성해역의 물리적 환경을 고려한 최적지 선정에 시도하였다. 하지만 분석과정에서 물리적 기준만을 고려하였다. 이는 생태학적 적합성이 중요한 바다숲 입지선정에서 치명적인 결함을 가진다. 차후 연구(오태건, 2010)에서는 서식지 적합지수(HSI)를 적용하여 생태학적 적합성, 물리학적 적합성을 종합적으로 고려하였다. 그러나 3차원 공간인 해양공간의 특성을 무시하고 해양환경요소 관측치를 2차원으로 공간보간한 점, HSI 모델 구성에서 모든 해양환경요소에 동등한 가중치를 적용하였다는 점에서 현실과 괴리가 있는 분석이라는 한계를 가진다.

본 연구는 행정적 편의성에 기초한 입지적합성 분석에서 벗어나, 지리정보시스템과 공간분석을 응용한 합리적인 바다숲 입지적합성 평가를 목적으로 한다. 이 과정에서 해양공간 특성을 고려한 3차원 공간모델링, 해양전문가 자문에 근거한 서식지 평가법(Habitat Evaluation Procedure, HEP)을 적용한다. 또한 입지적합성 평가기준으로 생태학적 기준, 해저지형 기준, 인문·사회환경 기준을 복합적으로 고려한다. 이를 통해 막대한 예산이 투입되는 바다숲 조성사업의 재정적 효율성을 달성하고자 한다. 장기적으로는 황폐화 된 연안생태계 복원, 어촌민의 소득증대 및 어촌계 활성화를 도모한다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. 연구지역, 대상 및 분석기준에서는 본 연구의 연구지역, 연구대상, 그리고 입지적합성 평가기준을 소개한다. 연구방법에서는 생태학적 적합성을 평가하기 위한 방법으로 서식지 평가법(HEP), 해양환경요소의 공간보간법으로 3D 크리깅(kriging), 해양환경요소의 가중치 산출방법으로 계층적 의사결정과정(Analytic Hierarchy Process, AHP)이 소개된다.

연구결과에서는 생태학적 적합성 평가결과와 해저지형 기준과 인문·사회환경 기준을 종합적으로 고려한 바다숲 입지적합성 평가결과가 제시된다. 결론에서는 연구내용을 요약하고, 연구의 차별성과 한계점을 언급한다.

2. 연구지역, 대상 및 평가기준

1) 연구지역

본 연구는 제주도를 대상으로 한다. 제주도는 우리나라에서 최초로 갯녹음이 발생한 지역이다. 1985년 서귀포시 법한 마을어장에서 갯녹음이 처음 발견된 이래로, 그 면적은 점차 확산되어 2003년에는 제주도 전체 마을어장의 약 30%가 갯녹음 피해를 입었다. 또한 2014년 현재 우리나라 전체 갯녹음 확산면적 14,317ha 중 약 40%인 5,755ha를 제주도가 차지하고 있다. 이러한 심각성에 기초하여 제주특별자치도는 2009년부터 제주도 바다숲 조성사업을 실시해왔다. 2013년에는 해양수산부 바다숲 조성사업 대상지 평가에서 우수한 성적을 받으면서, 2016년까지 5개 마을어장에 213억 원을 투입하여 바다숲을 조성할 계획이다. 5개 후보지는 조천, 행원, 보목동, 남원, 표선 마을어장이다. 본 연구는 지리적 인접성에 기초하여 5개 후보지를 2개 권역(조천연안, 서귀포·표선연안)으로 분할하여 입지적합성을 평가한다.

2) 연구대상

본 연구의 대상종은 감태(Ecklonia cava Kjellman)이다. 해조류는 모두 다른 서식조건을 지니고 있으며, 바다숲 조성해역 환경에 적합한 대상종을 선정하는 것이 중요하다(오태건, 2010). 국립수산과학원 아열대수산연구센터의 자문을 받

표 1. 감태의 주요 서식조건

| 대상종 | 2월 수온(°C) | 8월 수온(°C) | 염분(psu) | 투명도(m) | DIN($\mu\text{g/L}$) |
|-------------------------------------|-----------|-----------|---------|--------|------------------------|
| 감태(<i>Ecklonia cava Kjellman</i>) | 10~16 | 23~27 | >30.9 | 5~15 | 5.04~184.88 |

아, 제주도 바다숲 조성에 가장 적합한 해조류로 감태를 선정하였다. 감태는 모자반(*Sargassum fulvellum*)과 함께 인공어초 및 바다숲을 구성하는 대표종이다. 감태는 다년생 해조류로 길이가 1~2m이며, 주로 우리나라 남해안과 제주도, 일본 등지에 분포한다. 특히 높은 수온이 특징인 제주연안 환경에 적응이 유리한 종으로, 제주연안 생태계에서 생물학적 중심종이다. 감태의 주요 서식조건은 표 1과 같다.

3) 평가기준 및 분석데이터

선행연구(조명희 등, 2001; 오태건 등, 2010; 오태건, 2010)들의 비판적 검토를 토대로, 본 연구는 바다숲 입지적합성 평가기준으로 (1) 생태학적 기준, (2) 해저지형 기준, (3) 인문·사회환경 기준을 선정하였다. 첫 번째 평가기준은 대상종인 감태가 성공적으로 서식할 수 있도록 바다숲 조성지의 감태 서식지 적합도가 높아야 함을 의미한다. 생태학적 기준을 구성하는 해양환경요소는 수온(2월, 8월), 염분, 투명도, 영양염류(용존무기질소)

이다. 수온은 해조류의 생활을 규제하는 중요한 요인으로, 해조류의 광합성율과 호흡과정에 영향을 준다. 염분은 해조류 성장과정에서 몸의 형태 형성에 영향을 준다. 또한 해조류 종류에 따라 좋아하는 염분이 다르며, 서식할 수 있는 염분의 한계범위도 다르다. 투명도는 해조류의 광합성 작용에 직접적인 영향을 미치는 중요한 요인이다. 영양염류는 해조류가 성장하기 위해 요구되는 영양원이다. 특히 질소와 인은 식물성 플랑크톤 형성 및 해조류의 성장과 밀접한 관련이 있는 것으로 밝혀졌다. 관련 데이터베이스는 국가해양환경정보통합시스템(MEIS)에서 제공하는 해양환경측정망(2013) 관측자료를 바탕으로 구축하였다. 두 번째 평가기준은 해저지형의 수심과 경사도가 바다숲 인공어초가 안정적으로 자리잡기에 적합해야 함을 의미한다. 인공어초시설사업집행 및 관리규정(농림수산식품부, 2008)에 명시된 관련 기준을 적용하였다. 해양수산부 연안포탈(<http://www.coast.kr>)에서 제공하는 연안 수심데이터를 이용하여 해저 DEM을 구축한 뒤, 해저지형의 수심과 경사도를 측정하였다. 세 번째 평가기준은 지속 가

표 2. 바다숲 입지적합성 평가기준 및 분석데이터

| 평가기준 | 구성요소 | 분석데이터 |
|------------|---|--|
| 생태학적 기준 | 1. 수온(2월 수온, 8월 수온) 2. 염분 3. 투명도 4. 영양염류(용존무기질소) | 국가해양환경정보통합시스템(MEIS) 해양환경측정망자료(2013) |
| 해저지형 기준 | 1. 수심 2. 경사도 | 해양수산부 연안포탈 수심데이터 |
| 인문·사회환경 기준 | 1. 항만공사 영향권 | 건설산업지식정보시스템 건설공사위치정보(2014. 6) |

능한 바다숲 입지를 위한 기준으로, 바다숲에 부정적 영향을 미칠 수 있는 인문·사회환경 요소로 항만공사 영향권을 고려한다. 항만공사장 데이터 베이스는 건설산업지식정보시스템(<http://www.kiscon.net>)에서 제공하는 건설공사위치정보를 토대로 구축하였다. 위의 내용을 정리하면 표 2와 같다.

3. 연구방법

1) 서식지 평가방법(Habitat Evaluation Procedure, HEP)

서식지 평가방법(Habitat Evaluation Procedure, HEP)은 1969년 미국 NEPA(National Environmental Policy Act)에 의해 생태계의 환경가치를 계량적으로 평가하기 위해 개발된 평가법이다. HEP는 특정 생물종 서식지의 질이 측정 가능한 환경요소들에 의해 평가될 수 있다는 가정에 기초하고 있다. HEP 평가결과는 서식지 적합지수(Habitat Suitability Index, HSI)로 표현된다. HSI는 0에서부터 1사이의 값을 가지며, 0은 서식 불가능한 서식지를, 1은 최적의 서식지를 의미한다. HSI는 개별 환경요소의 SI(Suitability Index), 즉 적합지수의 결합으로 산출된다. 일반적으로 통용되는 결합방식에는 기하평균, 산술평균, 가중기하평균, 가중산술평균 등이 있는데, 본 연구는 가중산술평균을 이용한 HSI 산출 공식을 적용한다. 관련 식은 다음과 같다.

$$HSI = w_1 \cdot SI_1 + w_2 \cdot SI_2 + w_3 \cdot SI_3 + \dots + w_n \cdot SI_n$$

여기에서 SI_n 은 해양환경요소 n 의 적합지수를, w_n 은 해양환경요소 n 의 상대적 가중치를 의미한다.

2) 3D 크리깅(kriging)

본 연구의 공간분석은 해양공간을 기초로 이루어진다. 완전한 3차원인 해양공간을 2차원으로 모델링 및 분석할 경우에는 공간정보의 유실(loss)을 야기할 수 있으며, 제한적인 분석이 이루어질 수밖에 없다. 해양공간에 대한 3D 공간모델링은 수직 또는 수평방향으로 유연한 단층면 제작을 가능케 함으로써, 2D 공간모델링에 비해 해양공간 정보에 대한 보다 현실적인 분석을 제공할 수 있다. 따라서 본 연구는 해양환경요소 데이터의 공간공간을 위해 3D 공간보간법을 이용하였다. 특히 여러 공간보간법 중 해양환경 공간보간에 적합한 것으로 평가되는 3D 정규크리깅(ordinary kriging)을 실시하였다(Sahlin *et al.*, 2014).

크리깅(kriging)은 수학적 함수와 거리, 방향의 공간적 자기상관을 고려한 공간통계학적 공간보간법이다. 크리깅은 일정한 거리에 있는 공간데이터들의 유사성을 나타내는 척도로서 배리오그램(variogram)을 사용하여, 데이터에 내재되어 있는 전체적인 공간적 분포구조를 파악한다. 일반적으로 배리오그램의 반에 해당하는 반배리오그램(semivariogram)을 많이 사용하며, 반배리오그램은 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n [z(x_i) - z(x_i+h)]^2$$

여기에서 h 는 분리거리로서 두 공간데이터 간에 떨어져 있는 거리를 의미하며, n 은 분리거리가 h 인 공간자료 쌍의 개수를 의미한다. 공간데이터가 일정한 방향성을 나타내는 경우에는 배리오그램은 방향에 따라 상이할 수 있다. 이러한 경우에 공간데이터의 이방성(anisotropy), 즉 방향에 따라 값의 분포가 달라지는 특성을 반영한 방향적 배리오그램을 적절하게 모델링하여 크리깅에 적용해야 한다(김동휘 등, 2010). 2D 크리깅과 3D 크리깅의 결정적 차이 또한 배리오그램 모델링에서 이

방성이 어떻게 다루어지는가에 있다. 3D 크리깅에서는 3방향(X, Y, Z)에 대한 실험적 배리오그램(experimental variogram)을 이용하여 공간데이터의 이방성을 판단한다. X방향의 실험적 배리오그램은 시계방향으로 돌며 계속적으로 생산되며, Y방향의 실험적 배리오그램은 X방향과 반대로 반시계방향으로 돌며 계속적으로 생산되며, Z방향의 실험적 배리오그램은 수직방향으로 돌며 계속적으로 생산된다. 즉, 임의의 점에 대하여 분리거리를 반경으로 하는 구(sphere)형태로 실험적 배리오그램이 생성되는 것이다. 3방향에서의 주된 이방성이 탐색될 때까지 실험적 배리오그램 생산은 계속된다. 주된 이방성이 탐색된 후에는 3방향에서 주된 이방성을 보이는 실험적 배리오그램을 가장 잘 표현하는 이론적 배리오그램을 모델링한다. 이렇게 모델링된 이론적 배리오그램을 바탕으로 3D 크리깅²⁾이 수행된다(최종근, 2007; 박유민·김영호, 2012; Chehata *et al.*, 2007; Remy *et al.*, 2009; Sahlin *et al.*, 2014).

3) 계층적 의사결정 과정(Analytic Hierarchy Process, AHP)

계층적 의사결정 과정(Analytic Hierarchy Process, AHP)은 여러 요인들이 복합적으로 영향을 미치는 의사결정 문제에 있어서, 최적의 대안을 도출할 수 있는 분석틀을 제공해 준다. 계층적 의사결정 과정은 일반적으로 (1) 의사결정 계층구성, (2) 쌍대비교(pairwise comparison), (3) 가중치 산출, (4) 일관성 확인의 4단계로 이루어진다.

(1) 의사결정 계층구성

일반적으로 최상위 계층에는 가장 포괄적이고 종합적인 목표가 놓여지고, 최하위 계층은 실제 선택대상들로 구성된다. 이 과정에서 관련분야 전문가의 자문이 중요하게 고려된다.

(2) 쌍대비교행렬(pairwise comparison matrix) 작성

(1) 과정에서 계층화된 의사결정 문제는 다시 쌍대비교(여러가지 요소들 중 두 가지씩 비교)문제로 변환되고, 이 쌍대비교문제에 대한 설문참여자들의 응답결과를 바탕으로 쌍대비교 행렬이 만들어진다. 쌍대비교 행렬의 비대각(off-diagonal)성분을 구성하는 값은 쌍대비교문제에서 각 문제 별로 짝지어진 두 요소들 간의 상대적인 평가결과값으로 작성된다.

(3) 가중치 산출

본 연구는 고유벡터법을 사용하여 요소 별 상대적 가중치를 산출한다. 고유벡터는 어떠한 선형변환을 거치더라도 그 특성이 변하지 않으며 원행렬의 속성을 단순화하여 그대로 반영할 수 있는 벡터라는 점(Griffith, 1996)에서, AHP에서 가중치 벡터로 적합하다. AHP에서 쌍대비교행렬의 일관성은 유의미한 가중치 연산을 위해 매우 중요한데, 최대 고유값을 가지는 벡터인 주고유벡터(principal eigenvector)는 완벽히 일관성 있는 쌍대비교행렬로부터 얻어지는 가중치를 가장 잘 표현하는 벡터이다(Saaty, 2001). 따라서 일관성 있는 가중치를 구하는 과정은 주고유벡터와 대응하는 최대 고유값(λ_{max})을 구하는 고유값 문제로 요약될 수 있다. 이를 식으로 표현하면 아래의 식과 같다.

$$Aw = \lambda_{max}w$$

(4) 일관성 확인

쌍대비교 응답들 중 일관성이 확보되지 않은 응답들은 기하평균을 통한 가중치 산출과정에서 제외되기 때문에, 일관성 확인을 통해 유의미한 쌍대비교응답을 추출하는 것이 중요하다. 일관성 지수(Consistency Index, CI)는 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

일반적으로 일관성 지수가 0.1 이하인 쌍대비교 응답만이 논리적 일관성을 내포하고 있다고 판단되어, 쌍대비교행렬 형태로 가중치 산출과정에 포함된다.

4. 연구결과

1) 생태학적 적합성 평가

(1) 해양환경요소 별 적합지수(SI) 점수부여

앞서 HSI는 개별 적합지수(SI)의 결합으로 구성됨을 밝힌 바 있다. 각 해양환경요소는 감태 서식 조건에 따라 그림 1과 같은 SI 그래프를 나타낸다. 각 해양환경요소 별 SI 점수부여는 그림 1의 그래프에 기초하여 1차 함수형태의 선형보간으로 부여

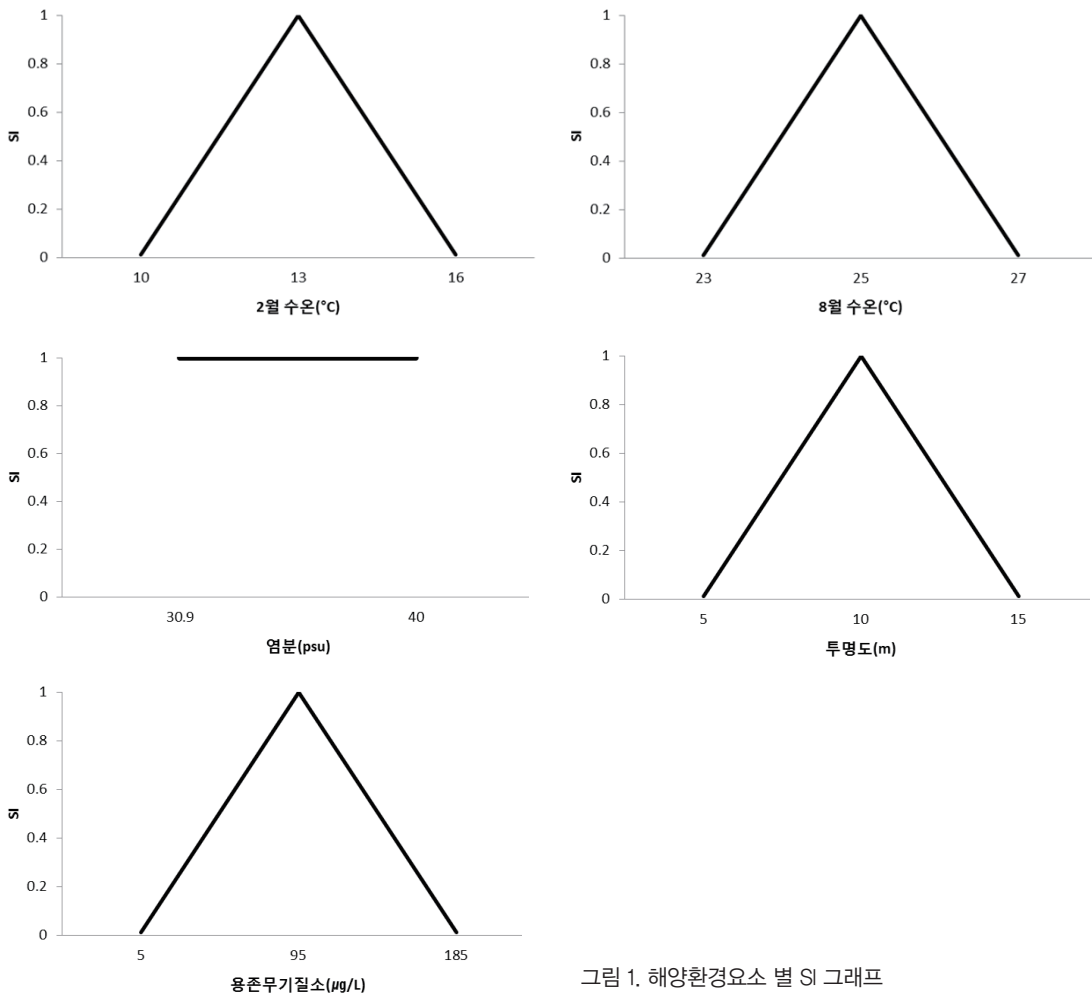


그림 1. 해양환경요소 별 SI 그래프

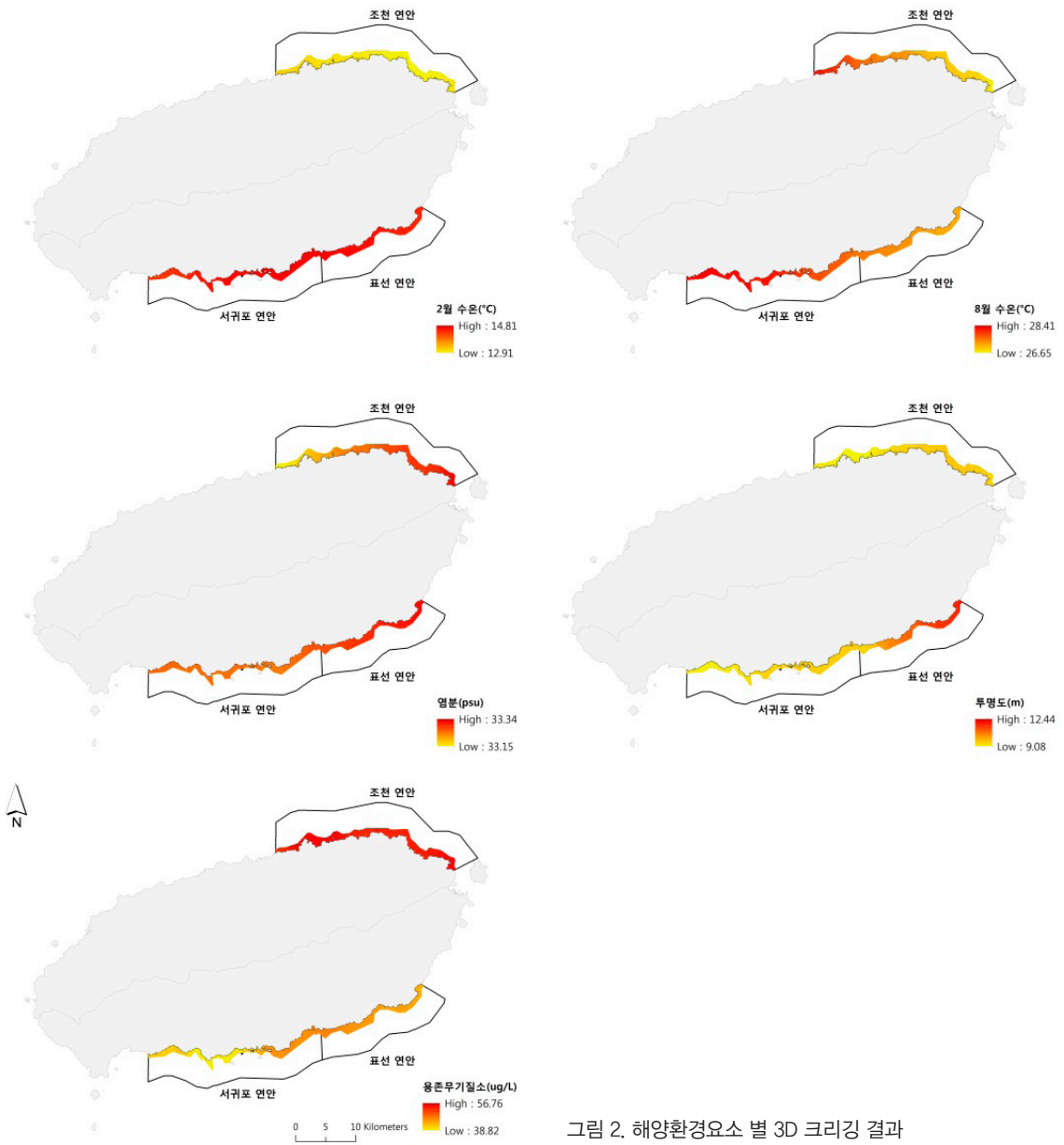


그림 2. 해양환경요소 별 3D 크리깅 결과

하였다. 선행연구(Wang and Lin, 2013)에 기초하여, SI 점수는 최저 0.01점에서 최고 1점까지 부여된다. 먼저 해양환경요소 별로 그림 2와 같이 3D 크리깅을 수행한 후, 그림 1의 SI 그래프에 기초하여 SI 점수를 부여한다. 점수부여 결과는 그림 3과

같다.

• 2월 수온 SI

2월 수온 SI 점수는 조천연안에 더 높게 부여되었다. 감태 서식을 위한 2월 수온 적정범위는 10~16°C이며, 이에 따라 최저온도는 13°C로 판

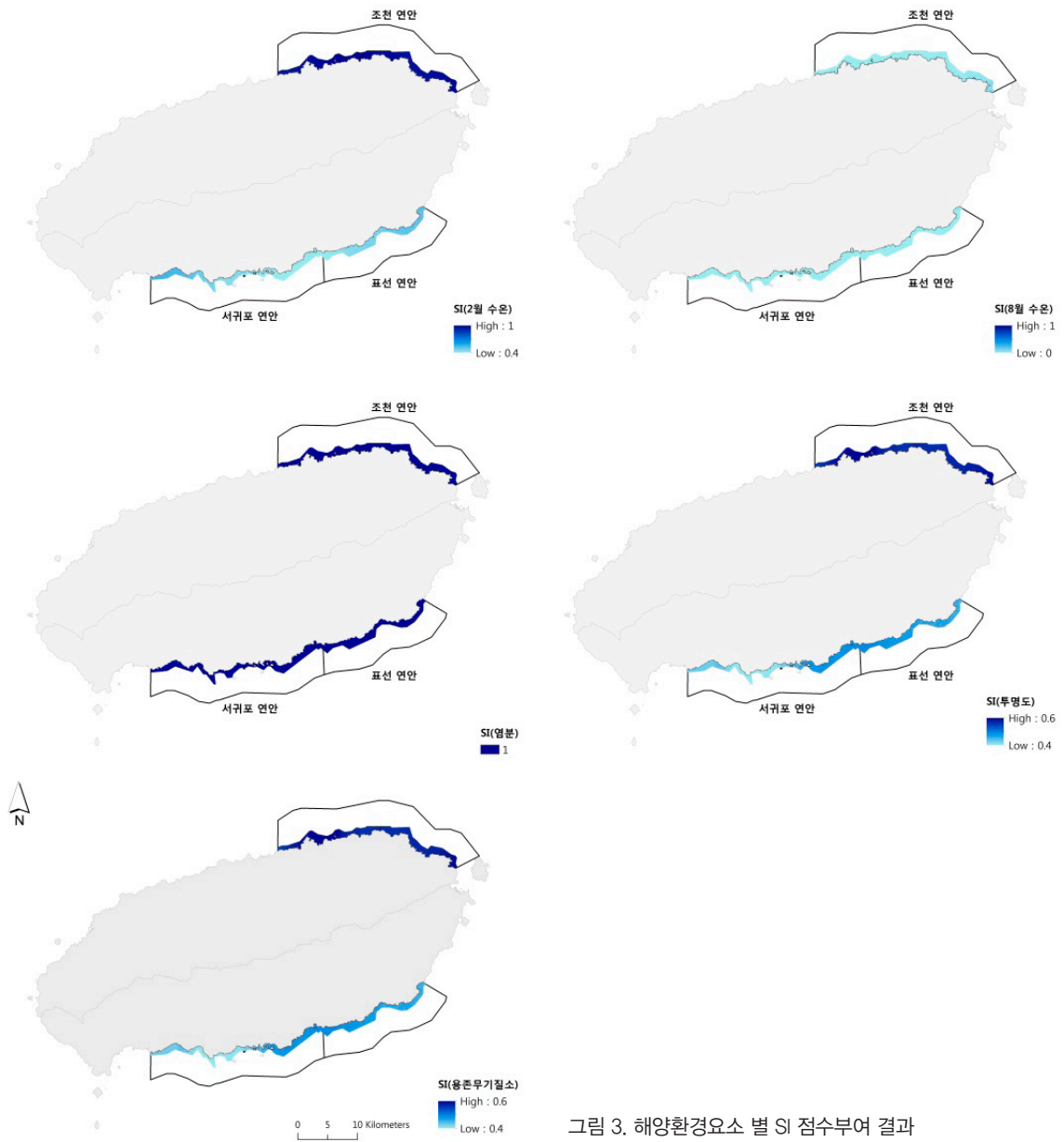


그림 3. 해양환경요소 별 SI 점수부여 결과

단된다(오태진, 2010). 조천연안은 12.9~13.28°C의 2월 수온 분포를 보였다. 조천연안은 서귀포·표선연안에 비해 고위도에 위치하며, 북한한류의 영향을 받아 최저온도 13°C에 근접한 2월 수온 분포를 나타낸 것으로 보인다. 반면에 남쪽해

역에 위치하며 쿠로시오 난류의 영향을 받는 서귀포·표선연안은 최적온도를 웃도는 2월 수온분포(14.22~14.81°C)를 보였다.

• 8월 수온 SI

8월 수온 SI 점수는 전역에 걸쳐 낮게 부여되

었다. 감태 서식을 위한 8월 수온 적정범위는 23~27°C이며, 중간값인 25°C가 최적온도로 평가된다(오태진, 2010). 조천연안의 8월 수온은 26.64~28.71°C의 분포를, 서귀포·표선연안의 8월 수온은 27.15~28.45°C의 분포를 보였다. 북한한류의 영향을 받는 조천연안이 최적온도에 다소 가까운 분포를 보였으나, 전반적인 적합도는 매우 낮은 수준으로 평가되었다.

• 염분 SI

감태는 평균 염분농도가 30.9 psu 이상만 되면 염분농도에 관계 없이 성장할 수 있다(오태진, 2010). 조천연안은 33.12~33.34 psu, 서귀포·표선연안은 33.24~33.37 psu의 염분농도 분포를 보였다. 따라서 전역에 걸쳐 SI 점수 만점(1,0)을 부여하였다.

• 투명도 SI

감태가 광합성을 하기 위한 최저투명도는 4m이며, 특히 5~15m 조건에서 광합성 하기에 가장 유리한 것으로 밝혀졌다(Terawaki *et al.*, 2001). 이에 따라 5~15m의 중간값인 10m가 최적값으로 평가된다(오태진, 2010). 조천연안은 8.95~9.69m, 서귀포·표선연안은 9.01~13.18m의 양호한 투명도 분포를 보여, SI 점수 또한 전반적으로 양호하게 부여되었다.

• 용존무기질소 SI

용존무기질소 SI 점수는 조천연안에 더 높게 부여되었다. 감태 성장을 위한 용존무기질소 적정범위는 5.04~184.88($\mu\text{g/L}$)이다. 최적값은 95($\mu\text{g/L}$)

이다. 조천연안은 52.69~57.3($\mu\text{g/L}$), 서귀포·표선연안은 37.78~47.29($\mu\text{g/L}$)의 분포를 보여, 최적값에 가까운 분포를 보인 조천연안에 더 높은 SI 점수가 부여되었다.

(2) 해양환경요소 별 가중치 산출

감태 성장에 있어서, 개별 해양환경요소의 중요도는 서로 다르다. 본 연구는 해양환경요소들의 가중치를 산출하기 위하여 AHP기법을 적용하였다. 앞서 언급한 바와 같이, AHP는 관련분야 전문가들의 설문을 기반으로 한다. 본 연구를 위한 AHP 설문조사는 2014년 6월 3일 제주특별자치도에 위치한 국립수산물학원 아열대수산연구센터 연구원들을 대상으로 실시하였다.

설문조사 결과를 바탕으로 가중치를 산출한 결과는 표 3과 같다. 일관성지수(CI)는 0.0132로 0.1의 조건을 만족한다. 8월 수온이 0.339로 가장 높은 가중치를 보였다. 전반적으로 최적온도보다 높은 8월 수온 분포를 보이는 제주연안에서, 적정 8월 수온 조건을 만족하는 것은 매우 중요하다. 영양염류인 용존무기질소가 그 다음으로 높은 가중치를 보였다. 아열대 수산연구센터의 자문에 따르면 영양염류는 해역에 따라 불균등하게 분포한다. 따라서 양호한 영양염류 분포를 보이는 해역을 탐색하는 것이 중요하다. 반면에 염분과 투명도는 각각 0.104, 0.083으로 상대적으로 낮은 가중치를 부여 받았다. 염분은 앞서 확인한 바와 같이, 30.9 psu 이상만 되면 무리가 없기 때문에 사료된다.

표 3. 해양환경요소 별 가중치

| 모델 | 해양환경요소 | 변수 | 가중치 |
|--------|-----------|--------|-------|
| 감태 HSI | 2월 수온 | SI_1 | 0.235 |
| | 8월 수온 | SI_2 | 0.339 |
| | 염분 | SI_3 | 0.104 |
| | 투명도(광조건) | SI_4 | 0.083 |
| | 영양염류(DIN) | SI_5 | 0.239 |

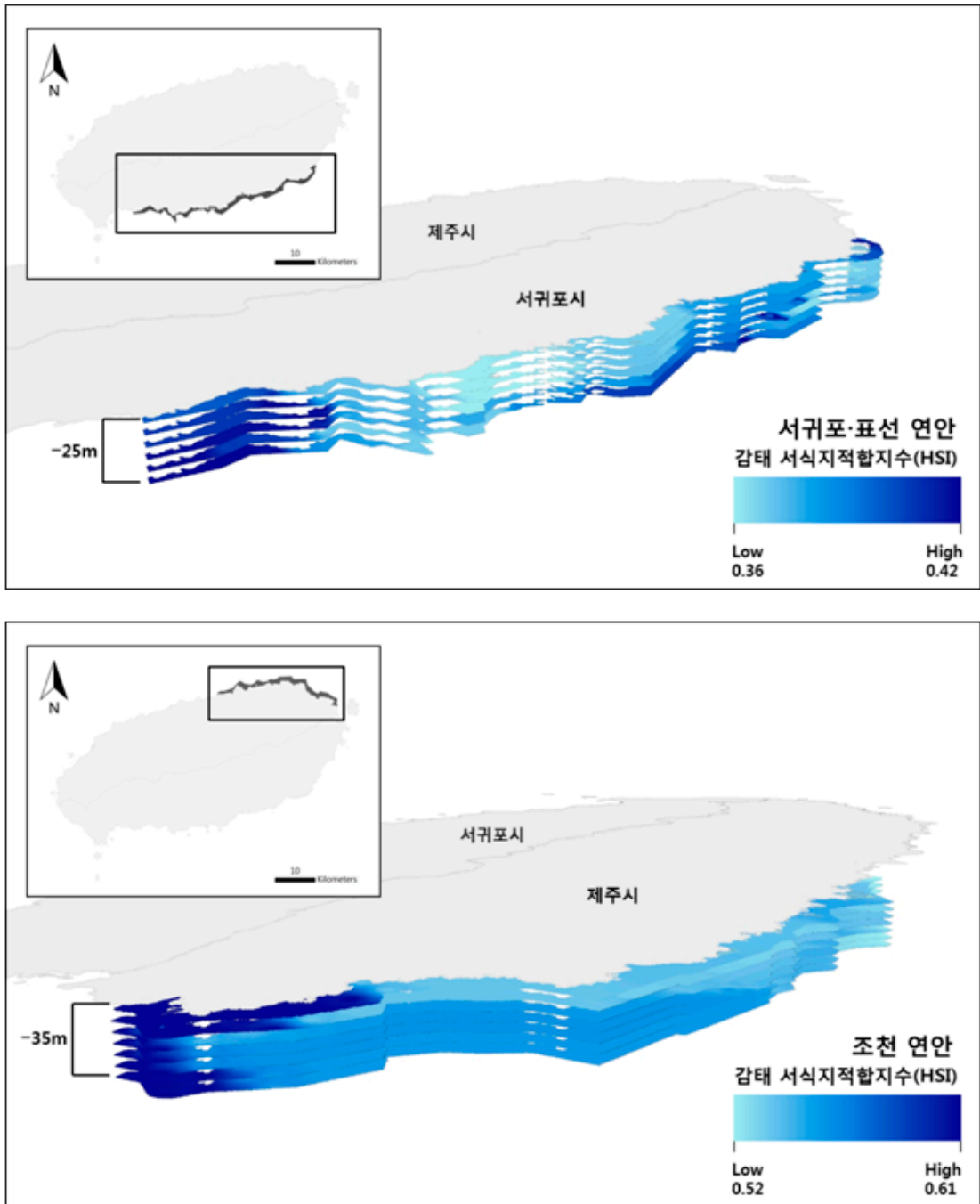


그림 4. 연구지역 별 감태 서식지적합지수(HSI) 분포도

투명도는 가장 낮은 가중치를 보였다. 이는 수질이 좋은 제주연안이 전반적으로 매우 높은 투명도(9m 이상)를 보이기 때문으로 추측된다.

(3) 연구지역 별 감태 서식지적합지수(HSI) 분포

위의 논의를 토대로 감태 HSI모델은 아래의 식과 같이 정리되며, 이에 기초한 연구지역 별 감태 서식지적합지수(HSI) 분포는 그림 4와 같다.

$$HSI_{감태} = 0.235SI_1 + 0.339SI_2 + 0.104SI_3 + 0.083SI_4 + 0.239SI_5$$

전체적인 HSI 분포는 영양염류에 따라 좌우되었다. 연구지역이 좁고 수심 또한 얇은 관계로, 수온의 수평적 및 수직적 분포차이는 미미했다. 반면에 영양염류는 지역에 따라 상이한 분포를 보였

다. 영양염류는 표층에서 높은 분포를 보인다. 육지의 영양염류를 함유한 하천수가 표층으로 유입되기 때문이다. 또한 중저층에서 높은 분포를 보인다. 해양생물체의 배설물과 사체가 주로 중저층에 쌓이기 때문이다. 지형적으로는 곳 지형보다는 만 지형에서 높은 분포를 보인다. 마지막으로 한류와 난류가 만나는 조정수역에 풍부하다.

서귀포·표선연안의 HSI 최대값은 0.42이다. 이는 감태 서식에 최대 42% 적합함을 의미한다. 위에서 설명한 영양염류의 분포특성에 따라, 그림 4와 같이 서귀포시 서쪽 끝과 동쪽 끝의 만지형에서 높은 HSI 분포가 나타났다. 또한 수직적으로는 이들 지역의 표층과 중저층에서 HSI 값이 높게 나타남을 확인할 수 있다. 조천연안의 HSI 최대값은 0.61이며, 이에 따라 이 지역은 감태 서식에 최대 61% 적합하다. 결과적으로 조천연안이 서귀포·표선연안보다 생태학적 적합성이 최대 19%

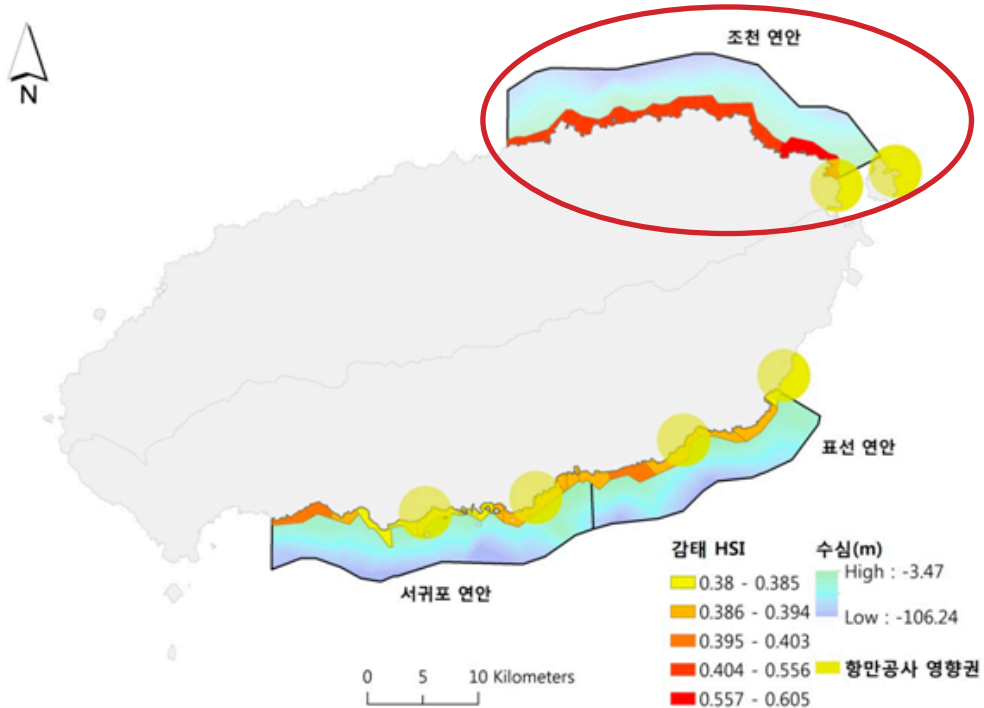


그림 5. 평가기준의 공간분포도

높은 것으로 평가할 수 있다. 그림 4의 조천연안 HSI 분포도에서 왼쪽지역은 제주도 동북쪽에 해당되는 지역으로, 황해난류와 북한한류가 만나는 조경수역이다. 영양염류가 풍부한 조경수역에서 HSI 점수가 높게 분포함을 확인할 수 있다. 조경수역 중에서도 표층과 중저층에서 상대적으로 높은 HSI 분포를 보인다.

2) 해저지형 기준 및 인문·사회환경 기준을 고려한 최종적합성 평가

인공어초시설사업집행 및 관리규정(농림수산 식품부, 2008)에 따르면, 바다숲 조성지의 수심은 70m 이하, 경사도는 5% 이하여야 한다. 위 조건을 만족할 때, 인공어초시설이 안정적으로 자리잡을 수 있다. 그림 5에서 확인할 수 있듯이, 조천연안과 서귀포·표선연안 마을어장의 수심은 모두 70m 이하이다. 또한 해저 DEM에 기초한 경사도 분석결과, 연구지역 내 최대 경사도는 4.07%로 조건을 만족한다. 따라서 해저지형 기준에서는 조천연안과 서귀포·표선연안의 적합성에 큰 차이가 없는 것으로 평가된다.

인간에 의한 과도한 연안개발은 갯녹음의 주요 원인 중 하나이다. 따라서 본 연구는 지속 가능한 바다숲 입지를 위해, 항만공사 영향권을 고려한다. 한국환경정책·평가연구원(2010)에 따르면, 항만 및 어항개발사업 영향범위는 해수유동 변화는 최대 2.4km, 부유사 확산범위는 최대 2km이다. 본 연구는 두 범위 중 더 넓은 범위인 해수유동 변화 영향범위인 2.4km를 항만공사 영향권으로 적용한다. 그림 5에서 확인할 수 있듯이, 조천연안에는 2개 공사현장이, 서귀포·표선연안에는 4개 공사현장이 영향을 미치고 있다. 영향권에 속하는 마을어장 면적은 조천연안은 1.59km², 서귀포·표선연안은 13.74km²로 서귀포·표선연안이 10배 이상 넓다. 생태학적 기준과 위의 2가지 조건을 복합적으로 고려했을 때, 조천연안에 감태 바다숲

을 조성하는 것이 더 적합한 것으로 평가된다.

5. 결론

본 연구는 제주도 바다숲 입지후보지를 대상으로 입지적합성을 평가하였다. 본 연구는 현재의 바다숲 조성지 선정과정이 행정적 편의성에 초점이 맞춰져 있는 것으로 평가한다. 이러한 문제의식에 기초하여, 지리정보시스템과 계량적인 공간분석을 응용한 합리적인 바다숲 입지적합성 평가를 시도하였다. 선행연구의 한계점을 보완하기 위하여, 해양공간의 3차원적 특성을 반영한 3D 크리깅기법을 적용하였으며, 전문가 자문에 근거한 해양환경요소 별 가중치 부여를 통해 보다 현실적인 HSI 모델을 구성하였다. 바다숲 대상종으로는 제주연안환경에 가장 적합한 감태(*Ecklonia cava* Kjellman)를 선정하였다. 입지적합성 평가기준으로는 생태학적 기준, 해저지형 기준, 인문·사회환경 기준이 종합적으로 고려되었다. 연구결과, 조천연안이 서귀포·표선연안에 비해 바다숲 입지적합성이 높은 것으로 평가되었다. 조천연안의 생태학적 적합성은 61%로, 서귀포·표선연안 보다 최대 19% 높았다. 해저지형기준 또한 모두 충족하였다. 인문·사회환경 기준 평가에서도 항만공사 현장 2개소, 마을어장 영향권 1.59km²로 서귀포·표선연안(항만공사현장 4개소, 마을어장 영향권 13.74km²)에 비해 우수한 평가를 받았다.

본 연구는 다음과 같은 학문적 차별성을 가진다. 첫째, 국내에서는 최초로 3D 공간보간법을 적용하여 해양공간을 분석하였다. 해양공간의 특성을 고려한 공간분석을 통해 보다 현실적인 바다숲 입지적합성 평가를 가능케 하였다. 둘째, 서식지 적합지수(HSI)산출 과정에서 전문가 자문에 근거하여, 해양환경요소 별로 차등적 가중치를 부여하였다. 해조류의 서식특성에 따라 우선적으로 고려

해야 할 해양환경요소가 다름에도 불구하고, 기존 연구에서는 모든 해양환경요소를 동등한 비중으로 고려하였다. 이는 현실과 동떨어진 분석결과를 낳을 수 있다. 셋째, 선행연구에서 고려하지 않았던 인문·사회환경 영향을 고려하였다. 바다숲 조성지 선정에 있어서 자연적 조건뿐만 아니라 인문적 조건도 매우 중요하다. 그럼에도 불구하고 기존 바다숲 입지분석 연구에서는 인문적 조건을 전혀 고려하지 않았다. 본 연구는 인문·사회환경 영향을 고려한 입지적합성 분석을 통해 지속 가능한 바다숲 입지를 추구한다. 위의 차별성들을 토대로, 본 연구의 바다숲 입지적합성 모델링은 상당한 현실성을 갖는다. 본 연구에서 바다숲 입지적합성이 높은 것으로 평가된 조천연안은 전국최초로 유용미생물을 이용한 바다숲 조성사업이 실제로 시행되고 있는 지역이다.³⁾

본 연구의 기대효과는 다음과 같다. 첫째, 막대한 예산이 투입되는 바다숲 조성사업에서의 재정적 효율성을 달성할 수 있다. 급속히 확산되고 있는 갯녹음 현상에 대응하여, 바다숲 조성사업도 가속도를 내고 있는 현실이다. 바다숲 조성사업 예산은 지속적으로 늘어나고 있는 추세이며, 2014년에는 지난해(198억원)보다 66% 늘어난 330억원이 투입된다(뉴시스, 2014. 2). 이러한 상황에서 재정적 효율성을 달성할 수 있는 합리적인 입지적합성 평가는 점차 중요해질 것으로 예상되며, 본 연구의 바다숲 입지적합성 평가 모델이 효과적인 방안이 될 수 있다. 둘째, 황폐화된 연안생태계 복원에 기여할 수 있다. 바다숲은 연안생태계의 초석이다. 바다숲 조성사업의 성공은 궁극적으로 연안생태계의 복원으로 이어진다. 셋째, 어촌민의 소득증가 및 어촌계 활성화에도 기여할 수 있다. 갯녹음으로 인한 어촌민의 경제적 피해는 심각할 수준이다. 바다숲의 성공적인 조성은 자연적으로 어촌민의 소득증가를 가져올 수 있다. 바다숲은 관광적인 요소도 가지고 있다. 실제로 제주도, 서산시, 군산시 등은 어촌체험관광형 바다목장 및 바다숲

조성을 추진하고 있다. 지역사회의 바다숲을 성공적으로 관광자원화 한다면, 바다숲 관광이 어촌계의 새로운 수입창출원으로 자리잡을 수 있다.

본 연구는 다음과 같은 한계점을 가진다. 첫째, 데이터 획득의 제약으로 많은 수의 관측치를 고려하지 못했다. 크리깅에서는 관측점에서 가까운 지역은 작은 추정오차를 보이며, 관측점에서 멀리 떨어질수록 큰 추정오차를 보인다. 따라서 관측치의 수가 적을수록 추정오차가 크게 발생할 수밖에 없다. 본 연구는 국가해양환경정보통합시스템(MEIS)에서 제공하는 해양환경측정망자료(2013)를 사용하였다. 본 연구에 활용된 해양환경측정망 관측점은 16개이다. 차후 연구에서 관측선을 이용한 고밀도 데이터 수집을 실시한다면, 보다 정밀한 해양공간분석이 가능할 것으로 판단한다. 둘째, 생태학적 적합성을 판단하는 과정에서 많은 종류의 영양염류를 고려하지 못했다. AHP를 통한 가중치 산출 결과, 영양염류는 수온 다음의 중요도를 가지는 것으로 나타났다. 용존무기질소 이외에도 용존무기인, 규산규소 등을 고려한다면 생태학적으로 보다 적합한 바다숲 입지선정이 가능하리라 기대한다.

주

- 1) 석회조류는 탄산칼슘이 주성분인 조류로, 해양생물의 먹이로서 가치가 없다. 석회조류의 변성은 기존 해조류 군락의 소멸을 초래한다. 석회조류는 죽으면서 석회질을 내뿜으며 하얗게 변하는데, 이 석회질이 연안암반을 덮으면 다른 해조류 서식할 수 없는 바다사막이 된다.
- 2) 본 연구의 3D 크리깅은 1000m by 1000m by 5m의 3D 그리드를 기준으로 수행되었다. 사용된 소프트웨어는 상용 GIS 소프트웨어인 ArcGIS 10.2(ESRI)와 익스텐션으로 설치되는 Isoliner10이다.
- 3) 이 사실은 연구과정에서 먼저 고려되지 않았으며, 해당 바다숲 조성사업 입지적합성 평가과정에 대해서도 참고한 바가 없다.

참고문헌

- 김대권 · 황선재 · 최옥인 · 최임호 · 한명일 · 신영재, 2011, “제주연안에서 기후변화가 갯녹음 확산에 미치는 영향,” *수산자원관리* 1(1), pp.1-17.
- 김동휘 · 류동우 · 최영민 · 이우진, 2010, “인천 송도지역 지층분포 추정을 위한 크리깅과 역거리가중치법의 적용,” *한국지반공학회논문집* 26(1), pp.5-19.
- 노용식 · 이희연, 2012, “세계화 · 기후변화시대의 지역 경쟁력 요인 분석,” *한국경제지리학회지* 15(4), pp.601-614.
- 농림수산식품부, 2008, *인공어초시설사업집행 및 관리규정*.
- 농림수산식품부, 2010, *바다숲 조성사업 시행지침*.
- 뉴스스, 2014, “수산자원관리공단, 바다숲 조성사업 확대 추진(2014. 2. 12)”.
- 박유민 · 김영호, 2012, “환경적 · 사회적 영향을 고려한 태양광발전소의 기존 입지 타당성 평가 및 지속 가능한 입지 제안,” *한국경제지리학회지* 15(3), pp.437-455.
- 서울신문, 2013, “갯녹음 매년 1200ha ↑ 바닷속 황폐화 심각(2013. 8. 16)”.
- 오테건 · 김대권 · 김창길 · 이문옥 · 조재권, 2010, “바다숲 조성해역의 물리적 환경을 고려한 최적 적지 선정,” *한국마린엔지니어링학회지* 34(1), pp.183-194.
- 오테건, 2010, *바다숲 조성을 위한 적지선정기법에 관한 연구*, 전남대학교 박사학위논문.
- 정준호 · 김광배, 2012, “기후변수가 강원도의 농업에 미친 경제적 효과 분석,” *한국경제지리학회지* 15(2), pp.192-205.
- 조명희 · 김병석 · 서영상, 2001, “위성원격탐사자료와 GIS를 이용한 인공어초 시설지 적지 선정 공간 분포도 작성 연구,” *대한원격탐사학회지* 17(1), pp.99-109.
- 최종근, 2007, *지구통계학*, 서울: 시그마프레스.
- 한국환경정책 · 평가연구원, 2010, *해안개발사업 환경영향평가 영향예측 결과에 근거한 해양동 · 식물상 조사정점 선정방안*, A 환1185 WP2010-11.
- Chehata, M., Jasinski, D., Monteith, M. C., Samuels, W. B., 2007, “Mapping Three-Dimensional Water Quality Data in the Chesapeake Bay Using Geostatistics,” *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 43(3), pp.813-828.
- Griffith, D. A., 1996, “Spatial Autocorrelation and eigenfunctions of the geographic weights matrix accompanying geo-referenced data,” *The Canadian Geographer/Le Géographe canadien* 40(4), pp.351-367.
- Remy, N., Boucher, A., Wu, J., 2009, *Applied geostatistics with SGeMS: A user's guide*, UK: Cambridge University Press.
- Saaty, T. L., 2001, *Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process*, Norwell, Massachusetts: Kluwer Academic Publishers.
- Sahlin, J., Mostafavi, M. A., Forest, A., Babin, M., 2014, “Assessment of 3D Spatial Interpolation Methods for Study of the Marine Pelagic Environment,” *Marine geodesy* 37(2), pp.238-266.
- Terawaki, T., Hasegawa, H., Arai, S., Ohno, M., 2001, “Management-free techniques for restoration of Eisenia and Ecklonia beds along the central Pacific coast of Japan,” *Journal of applied phycology* 13(1), pp.13-17.
- Wang, F., Lin, B., 2013, “Modeling habitat suitability for fish in the fluvial and lacustrine regions of a new Eco-city,” *Ecological Modeling* 267, pp.115-126.
- 교신: 김영호, 136-701, 서울시 성북구 안암로 145 고려대학교 지리교육과, 전화: 02-3290-2368, 팩스: 02-3290-2360, 이메일: younghokim@korea.ac.kr
- Correspondence: Youngho Kim, Dept. of Geography Education, Korea University, Anam Dong, Seungbuk-Gu Seoul, 136-701, Korea, Tel: 82-2-3290-2368, E-mail: younghokim@korea.ac.kr
- 최초투고일 2014년 11월 1일
수정일 2014년 11월 25일
최종접수일 2014년 11월 27일