Article

마이크로네시아 웨노섬 연안 서식지 분포의 현장조사와 위성영상 분석법 비교

김태훈¹ · 최영웅¹ · 최종국² · 권문상³ · 박흥식^{1*}

¹한국해양과학기술원 태평양해양연구센터

²한국해양과학기술원 해양위성센터

³한국해양과학기술원 해양정책연구소

(426-744) 경기도 안산시 상록구 해안로 787

Comparison between *in situ* Survey and Satellite Imagery with Regard to Coastal Habitat Distribution Patterns in Weno, Micronesia

Taihun Kim¹, Young-Ung Choi¹, Jong-Kuk Choi², Moon-Sang Kwon³, and Heung-Sik Park^{1*}

¹Pacific Ocean Research Center, KIOST

²Korea Ocean Satellite Center, KIOST

³Ocean Policy Institute, KIOST

Ansan 426-744, Korea

Abstract : The aim of this study is to suggest an optimal survey method for coastal habitat monitoring around Weno Island in Chuuk Atoll, Federated States of Micronesia (FSM). This study was carried out to compare and analyze differences between *in situ* survey (PHOTS) and high spatial satellite imagery (Worldview-2) with regard to the coastal habitat distribution patterns of Weno Island. The *in situ* field data showed the following coverage of habitat types: sand 42.4%, seagrass 26.1%, algae 14.9%, rubble 8.9%, hard coral 3.5%, soft coral 2.6%, dead coral 1.5%, others 0.1%. The satellite imagery showed the following coverage of habitat types: sand 26.5%, seagrass 23.3%, sand + seagrass 12.3%, coral 18.1%, rubble 19.0%, rock 0.8% (Accuracy 65.2%). According to the visual interpretation of the habitat map by *in situ* survey, seagrass, sand, coral and rubble distribution were misaligned compared with the satellite imagery. While, the satellite imagery appear to be a plausible results to identify habitat types, it could not classify habitat types under one pixel in images, which in turn overestimated coral and rubble coverage, underestimated algae and sand. The differences appear to arise primarily because of habitat classification scheme, sampling scale and remote sensing reflectance. The implication of these results is that satellite imagery analysis needs to incorporate *in situ* survey data to accurately identify habitat. We suggest that satellite imagery must correspond with *in situ* survey in habitat classification and sampling scale. Subsequently habitat sub-segmentation based on the *in situ* survey data should be applied to satellite imagery.

Key words : Micronesia, Chuuk Atoll, habitat distribution, *in situ* survey, satellite imagery

*Corresponding author. E-mail : hspark@kiost.ac

1. 서 론

산호초(coral reefs)는 열대해역에서 대표되는 서식지 중 하나로 해양 생태계에서 단위 면적당 생물 종 다양성이 가장 높고, 자원이 풍부하다. 산호초와 더불어 대표적인 열대 연안 서식지로 잘피밭(seagrass beds)은 천해 환경에 형성되어 높은 생산력을 가지고 있으며, 해수의 용존 산소량을 조절하고, 부유물질 발생을 최소화하여 안정된 서식 환경을 제공하는 역할을 한다(Short and Short 1984; Stevenson 1988). 이 두 서식지는 열대지역 연안에서 지리적, 환경적 조건에 따라 분포와 면적의 차이를 나타내고 있으며, 생태학적으로 중요한 위치를 차지하고 있다. 따라서 열대 연안 생태계에서 잘피밭과 산호초 서식지 모니터링을 통한 건강성 평가, 서식지 변동 감지, 그리고 잠재적 변화 예측은 연안 자원 관리를 위해 매우 중요하다.

서식지 모니터링에는 현장조사(*in situ* Survey)에 의한 방법과 위성영상을 활용하는 방법(Satellite Imagery)이 있다. 현장조사 방법은 서식지 분류가 간단하고, 빠른 데이터 수집이 가능한 것이 장점이다(English et al. 1994; Green et al. 2000; Lam et al. 2006). 그러나 조사와 데이터 분석에 많은 시간이 소요되고, 소규모 지역을 조사하여 전체를 평가하기 때문에 기후변화, 사이클론 또는 인간 활동에 따른 영향 등 광범위하게 발생하는 서식지 변동을 감지하기에는 한계가 있다(Green et al. 2000; Joyce et al. 2004; Lam et al. 2006; Wilkinson 2008; Hochberg 2011). 위성영상 활용법은 Landsat ETM, SPOT5, Quickbird, IKONOS, Worldview-2 등 위성탐사기술 발전과 함께 해양 서식지 분포도 작성에도 적용되었다(Smith et al. 1975; Green et al. 2000). 이 방법은 짧은 시간 내에 영상 확보와 데이터 분석이 가능하여 광범위하게 진행되는 서식지 변동을 신속하게 감지할 수 있다(Green et al. 2000; Joyce et al. 2004; Yamano and Tamura 2004; Kuster and Jupp 2006). 그러나 생태학적으로 복잡한 서식지를 정밀하고 세분화하여 표현하는 방식에는 제한적이어서 지역적으로 발생하는 변동을 감지하기에는 오차 범위가 크게 나타나기도 한다. 또한, 서식지 분류가 단순하고, 결과의 정확성이 낮기 때문에 현장조사가 보완되지 않는다면 장기적인 서식지 관리를 위한 자료로 활용하기에 어려운 점이 있다(Andréfouët et al. 2003; Joyce et al. 2004). 따라서 최근에는 산호초와 잘피 서식지를 대상으로 현장조사 결과와 위성영상 분석 결과를 통합하기 위한 연구가 수행되고 있다(Roelfsema et al. 2007). 이 연구 결과는 조사지역 규모에 따라 위성영상 분석 결과와 현장조사 결과에 각기 다르게 적용되어 연안 서식지 변동을 감지하기 위한 모니터링 자료로 활용되기도 하였다(Palandro et al. 2008).

이와 같이 통합에 대한 연구는 산호초 또는 연안 서식

지 모니터링에서 주로 진행되고 있지만, 다양한 서식지가 혼재하는 -잘피밭과 산호초, 산호파편, 모래 등 좁은 공간에서 서식지 구배를 나타내는- 생태계에서 현장조사 결과와 위성영상 분석 결과에 대한 정량적인 비교 연구는 거의 이루어지지 않고 있다. 이번 연구에서는 웨노섬 연안에 혼재하여 나타나는 잘피와 산호초 서식지를 대상으로 현장조사와 Worldview-2 위성영상으로 분석한 서식지 분포도를 작성하여 결과를 정량적으로 비교 분석하였다. 나아가 현장조사 결과를 위성영상 분석에 적용하여 대상 해역에서 서식지를 평가하기 위한 통합된 서식지 분류 기준과 방안을 제시하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

대상해역

마이크로네시아 연방국은 축(Chuuk), 코스래(Kosrae), 폰페이(Pohnpei), 압(Yap) 4개의 주로 이루어져 있고, 607개의 화산섬과 산호섬, 그 외의 크고 작은 무인도가 존재한다(Fig. 1). 축 주는 15개의 주요 섬과 250여개의 크고 작은 섬으로 이루어져 있다. 축 주에 속한 축 환초(Chuuk Atoll)는 둘레가 225 km로 남서태평양에서 가장 오래 전에 형성된 환초이며, 환초 내에는 11개의 큰 섬이 위치하고 있다. 연안 기수역에는 맹그로브 군락이 분포하고, 연안에는 잘피밭과 산호초가 발달한 열대 지역의 서식지 특성을 가지고 있다. 또한, 이 지역 연평균 기온은 27°C이고, 연평균 수온은 28-29°C이며, 연평균 강수량은 3,000 mm로 열대기후 특성을 가진다. 조사지역은 해안선 주변에 산호 모래가 퇴적되어 잘피밭이 형성되어 있고, 리프에는 산호초가 발달된 웨노섬(Weno Island) 북동부 연안 베네딕 리프(Benedict Reef)를 대상으로 하였다(Fig. 2).

현장조사

현장조사를 위해 2010년 3월 웨노섬 북동부 연안에서 리프 가장자리(reef edge)까지 3개의 조사지선을 설정하였다. 조사지선은 외해와 만나는 지점에 형성되는 리프 언덕(reef crest)에서 발생하는 파랑작용 차이에 따라 보호된 지역(sheltered area), 노출된 지역(exposed area), 반 노출된 지역(semi-exposed area)으로 구분하였다(Fig. 2). 조사 방법은 잘피밭과 산호초 서식지의 분포조사에 모두 적용할 수 있는 PHOTS (Photo Quadrat Method) 방법을 이용하였다(English et al. 1994). 정점은 10-20 m 간격으로 지정하였고, 각 정점에서 1.0 m × 1.0 m 방형구를 설치하여 수중 카메라(G10, Canon)로 촬영하였다. 조사지선 1, 2, 3에서 각각 25, 93 그리고 49개의 조사 정점 방형구 이미지를 확보할 수 있었다(Table 1). 촬영된 이미지는 Image-Pro PLUS 프로그램을 이용하여 방형구내에 분포하는 각

Fig. 1. Map of Weno Island in Chuuk Atoll, Federated States of Micronesia

Fig. 2. Map of the study area (red dots indicate the sampling stations for satellite imagery, yellow lines indicate the transects for *in situ* survey)

Table 1. Topographical characteristics on the study area by *in situ* survey transects

	Transect-1	Transect-2	Transect-3
Total Length (m)	236	963	483
Number of Stations	25	93	49
Depth range (m)	0.5-4.3	0.5-9.8	0.5-3.5
Reef Type	Fringing Reef	Fringing Reef	Fringing Reef
Wave effect	Sheltered	Exposed	Semi-Exposed

서식지 면적을 산정하고, 전체 면적 대비 백분율로 환산하여 피도(coverage)를 계산하였다.

서식지 분류는 리프체크(Reef Check)과 호주해양국(Australia Institution of Marine Science)의 분류 코드를 참고하였다(English et al. 1994; Jonker et al. 2008). 특히, 이번 연구에서는 산호초 서식지 뿐만 아니라 잘피 서식지 분포를 확인하기 위해 기존에 해조류로 분류된 잘피를 세분화하여 분류하였다. 재구성된 서식지는 모래(Sand), 잘피(Seagrass), 돌산호(Hard Coral), 연산호(Soft Coral), 죽

Table 2. Classification scheme of habitat groups applied in this study

Class	<i>in situ</i> Survey	Satellite Imagery
Class 1	Sand	Sand
	Seagrass	Seagrass
	-	Sand + Seagrass
Class 2	Dead Coral	Coral
	Hard Coral	
	Soft Coral	
Class 3	Algae	-
Class 4	Rubble	Rubble
	Rock	Rock
Class 5	Other	-

은 산호(Dead Coral), 해조류(Algae), 산호파편(Rubble), 암반(Rock) 그리고 대형 무척추동물(Benthos), 미분류(Indeterminate) 등을 기타(Other)로 정의하여 총 9가지로 분류하였다(Table 2).

위성영상 분석

위성영상을 이용한 서식지 분류를 위해 현장조사 시기와 비슷하게 2010년 2월 3일 웨노섬 연안에서 Worldview-2 영상을 확보하였다. 작성된 서식지 분포도는 현장 검증을 위해 2010년 1월 30일부터 2월 2일까지 조사지선 A와 B 그리고 주변 정점을 포함하여 77개 정점에서 수행하였다(Fig. 2). 서식지 분포도 작성은 객체기반 영상분류 방법(object based classification)으로 실시하였다. 이 방법은 비슷한 특성을 지닌 픽셀을 그룹화하여 객체로 만든 후 객체를 이용하여 모양이나 상호관계를 분석하는 방법으로 고해상도 영상에 많이 활용되고 있다(Min et al. 2010). 객체기반 영상분류 방법의 처음 단계는 객체(segmentation) 단계로 영상을 색상(color), 픽셀 그룹의 형태(shape), 공간 해상도에 따라 객체(segment)를 정의한다. 두번째 단계는 처음 단계에서 자동이나 수동으로 지정된 객체들을 각 객체의 색상(color), 형태(shape), 질감(texture), 위치(position) 그리고 생물리화적인 특징(biophysical properties)을 이용하여 반복적으로 영상 분류를 실시한 후, 서식지 분포도를 작성하는 것이다(Roelfsema et al. 2010). 서식지 형태 분류는 웨노섬 연안 서식지 특성을 고려하여 모래(Sand), 잘피(Seagrass), 모래와 잘피 혼재(Sand + Seagrass), 산호(Coral), 산호파편(Rubble), 암석(Rock)으로 구분되었다(Table 2). 이번 연구에서는 자료 분석을 위해 객체 지향 이미지 분석 소프트웨어인 Definiens® Developer 7 프로그램을 사용하였다. 작성된 서식지 분포도에서 정확성 검증을 위하여 23개 정점에 대하여 수행한 현장 조사 결과(processing data)를 현장검증 데이터(*in situ* observation

data)와 비교하여 오차표(Error matrix)를 작성하였다.

현장조사와 위성영상 분석에 의한 서식지 분포 비교

현장조사에 의한 서식지 분포와 위성영상 분석에 의한 서식지 분포를 비교하기 위해 피도값을 기준으로 한 양적인 비교와 분류도를 기준으로 한 가시적인 비교를 실시하였다. 이를 위해 우선적으로 서식지 형태 분류를 일치시켰다. 그러나 위성영상 분석에서는 해조류 감지가 어렵기 때문에 서식지 분류에는 포함되지 않았고, Worldview-2 영상 분석에서 픽셀 1.8 m × 1.8 m 가 하나의 서식지로 대표되기 때문에 모래와 잘피가 동시에 나타나는 공간을 정의하기 위해 ‘모래와 잘피 혼재’ 분류를 추가시켰다(Table 2). 서식지 형태 분류를 바탕으로 웨노섬 북동부 연안 서식지에 대해 분류군별 피도값으로 정량적인 비교를 실시하였다. 특히, 각 조사지선별 공간 분포 비교를 위해서는 현장조사 지선에 해당되는 면적과 위성영상 분포 면적을 일치시켜 비교함으로써 정밀성을 높이고자 하였다. 다음으로 서식지 분류도를 기반으로 가시적인 비교를 하기 위해 정점별 현장조사 결과를 ArcGIS 프로그램을 이용하여 지도상에 모식화시켜 위성영상 분석에 의한 분류도와 비교할 수 있도록 하였다.

3. 결 과

현장조사에 의한 서식지 분포

현장조사 결과 서식지 형태별 분포는 모래 42.4%, 잘피 26.1%, 해조류 14.9%, 산호파편 8.9%, 돌산호 3.5%, 연산호 2.6%, 죽은 산호 1.5%, 기타 0.1% 순으로 나타났다(Table 3). 모래는 42.4%로 가장 넓게 분포하였고, 출현빈도 또한 92.8%로 가장 높게 나타났다(Table 3). 모래지역은 잘피와 산호초 사이 넓고 평평한 리프 평원(reef flat)에 집중적으로 분포하였으며, 연안에 분포하는 잘피는 해산식물의 일종으로 모래지역에 뿌리를 내리고 서식하기 때문에 조사지역 해안선 주변은 대부분 모래지역이라 할 수 있다(Fig. 3a). 잘피는 26.1%로 모래 다음으로 넓은 면적을 차지하였고, 출현빈도는 65.3%로 나타났다(Table 3). 잘피는 연안에서부터 리프 평원(reef flat)에 광범위하게 나타났다(Fig. 3a). 해조류는 14.9%로 모래와 잘피 보다 분포면적은 적지만, 출현빈도는 92.2%로 조사 정점 대부분에서 나타났다(Table 3).

산호파편으로 형성된 서식지는 8.6%, 출현빈도는 24.4%로 나타났다(Table 3). 산호파편은 리프 언덕(reef crest) 돌산호 분포 지역 주변에 주로 분포하는 것으로 나타났다(Fig. 3a). 이는 지형 특성상 외해와 만나는 리프 언덕과 경사면은 파도의 침식작용으로 죽은 산호파편이 리프 끝에 쌓여 떠를 이루어 분포하는 것으로 나타났다. 돌산호는

Table 3. Distribution characteristics of habitat groups using *in situ* survey

Class	Habitat Group	Color	Total abundance (m ²)	Mean Density (m ²)	Frequency (%)	Coverage (%)
Class 1	Sand	Yellow	70.9	0.4	92.8	42.4
	Seagrass	Green	43.6	0.3	65.3	26.1
Class 2	Dead Coral	Light Brown	2.5	0.01	14.4	1.5
	Hard Coral	Dark Purple	5.9	0.04	23.4	3.5
	Soft Coral	Pink	4.3	0.03	14.4	2.6
Class 3	Algae	Blue	24.9	0.1	92.2	14.9
Class 4	Rubble	Brown	14.9	0.1	28.7	8.9
	Rock	Grey	0	0	0	0
Class 5	Other	Dark Grey	0.1	0	17.4	0.1

Fig. 3. (a) Transect cross section of Benedict Reef showing percent habitat coverage using *in situ* survey data. (b) Habitat distribution map of Benedict Reef using Worldview-2 imagery

피도 3.5%, 출현빈도는 23.4%로 리프 평원과 언덕에 주로 분포하였고, 리프 경사면에는 낮은 피도로 분포하였다(Table 3, Fig. 3a). 연산호는 피도 2.6%, 출현빈도는 14.4%로 연안 잘피 서식지 이후에 형성되는 리프 평원에 주로 분포하였다(Table 3, Fig. 3a). 특히, 리프 평원에서 나타나는 돌산호와 연산호는 모래기질 위에 패치(patch)를 형성하며 군락을 이루고 있었다. 작은 산호는 산호파편이 되기 이전 단계로 피도 1.5%, 출현빈도는 14.4%로 나타났고, 돌산호가 분포하는 초 언덕에서 주로 관찰되었다(Table 3, Fig. 3a). 무척추동물을 포함한 기타 분류에서 피도 0.1%, 암반은 부분적으로 리프 언덕에 존재하지만 조사 정점에는 포함되지 않았다(Table 3).

위성영상 분석에 의한 서식지 분포

Worldview-2 위성영상을 이용하여 객체기반 분류법으로 완성된 서식지 분포도에서 위성영상 분석 결과 서식지 분포는 모래 26.5%, 잘피 23.3%, 모래와 잘피 혼재 12.3%, 산호 18.1%, 산호파편 19.0% 그리고 암반 0.8%로 나타났다(Table 4, Fig. 3b). 서식지 분포도를 살펴보면 잘피 서식지는 해안선 주변에 광범위하게 분포하고 간헐적으로 산호초가 분포하는 것으로 나타났다. 해안선에서 리프 가장자리까지 거리가 멀수록 잘피와 모래가 혼재하는 서식지가 넓게 형성되었고, 리프 평원에서 리프 언덕으로 연결되는 지역에는 산호초가 분포하고, 리프 경사면에는

떠 형태로 산호파편과 함께 잘피가 분포하는 것으로 나타났다(Fig. 3b). 서식지 분포도에서 정확성 검증 결과 전체 정확성은 65.2%로 나타났다(Table 5). 산호파편은 4개 정점에서 현장 검증한 결과 100% 일치해 가장 정확하게 분류되었고, 산호 분류 또한 정확성이 75%로 높았다.

현장조사와 위성영상 분류에 의한 서식지 분포 비교

현장조사와 위성영상 분석에 따른 서식지 분포와 피도를 정량적으로 비교한 결과 현장조사 분류에는 산호 분류가 돌산호(2.4%), 연산호(2.7%), 죽은 산호(1.0%)로 세분화되었지만, 위성영상 분포도에는 산호(18.0%)가 하나의 서식지로 분류되어 10.4% 과대평가 되었다(Table 6). 산호파편 또한 위성영상 분석 결과에서 10.1% 과대평가 되는 것으로 나타났다. 반면, 현장조사 결과 해조류는 14.9%로 높은 면적을 차지하지만, 위성영상 분석에는 해조류 서식지를 감지하지 못하였다(Table 6). 모래와 잘피 서식지 분포는 위성영상 분석에서 현장조사 결과보다 6.4% 과소평가 되어 큰 차이가 없었지만, 위성영상 분석 결과 오차표에 따르면 정확성은 50%로 낮아 전체 정확성을 감소시키는데 가장 큰 원인으로 작용하였다(Table 5, Table 6).

조사지선 1, 2, 3에서 현장조사 결과와 위성영상 결과 서식지 피도를 정량적이고 정밀하게 비교한 결과 지선별로 조금씩 차이가 나타났다(Fig. 4). 위성영상 분석에 의한

Table 4. Habitat classification using Worldview-2 satellite imagery

Class	Habitat Group	Color	Pixel	Area (m ²)	Coverage (%)
Class 1	Sand		50,334	164,176	26.5
	Seagrass+Sand		23,449	76,508	12.3
	Seagrass		44,263	144,336	23.3
Class 2	Coral		36,201	118,048	19.0
Class 4	Rubble		34,332	111,972	18.1
	Rock		1,515	4,960	0.8
Total			190,094	620,000	100

Table 5. Error matrix calculated by classified imagery

		in situ Observation Data					
Processing Data	Classification	Coral	Seagrass	Seagrass + Sand	Sand	Rubble	User Accuracy
	Coral	3	0	0	0	1	3/4
	Seagrass	0	3	2	0	1	3/6
	Seagrass + Sand	0	1	0	0	0	0/1
	Sand	1	1	1	5	0	5/8
	Rubble	0	0	0	0	4	4/4
	Producer Accuracy	3/4	3/5	0/3	5/5	4/6	15/23 (65.2%)

Table 6. Habitat composition and coverage comparison between *in situ* survey and Worldview-2 satellite imagery of Benedict Reef in Weno Island

	<i>In situ</i> Survey coverage (%)	Satellite Imagery coverage (%)
Sand	42.4	26.5
Seagrass	26.1	23.3
Sand + Seagrass	-	12.3
Total	68.5	62.1
Hard Coral	3.5	
Soft Coral	2.6	18.0
Dead Coral	1.5	
Total	7.6	18.0
Algae	14.9	-
Rubble	8.9	19.0
Rock	0	0.8
Other	0.1	-
Sum of Total	100	100

Fig. 4. Habitat distribution comparison among transects by *in situ* survey and Worldview-2 satellite imagery

서식지 분포는 현장조사 결과와 비교해 산호와 산호파편은 과대평가되었고, 해조류와 모래는 과소평가 되는 양상을 나타냈다(Fig. 4). 현장조사 결과 조사지선 1은 지선 2, 3과 비교해 연안에 잘피 서식밀도가 높기 때문에 상대적으로 모래는 과소평가 되었다. 또한 현장조사 결과 산호는 리프 평원과 언덕에 주로 분포하지만 위성영상 분석 결과 연안 모래지역에 서식하는 것으로 오분류 되었다.

위성영상 분석에 의한 서식지 분포도에서 오분류된 부분을 가시적으로 확인하기 위해 현장조사 결과 서식지 분포 피도를 각 조사 정점 위에 그래프를 모식화한 분포도와 비교하였다(Fig. 3). 그 결과 현장조사 결과 연안에는 잘피가 밀생하고, 산호 분포는 제한적으로 나타났지만 위성영상 결과에서는 산호가 부분적으로 분포하여 오분류되는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 3). 또한 현장조사 결과 리프 경사면에는 산호파편과 해조류가 분포하였고, 잘피 분포는 제한적이지만 위성영상 결과에서는 리프 언덕과 경사면에 잘피가 광범위하게 분포하는 것으로 오분류되었다(Fig. 3). 이와 같은 오분류는 위성영상 분석에 있어 정확성을 낮추는데 가장 큰 원인으로 작용하였고, 이는 정확성 검증을 위한 오차표를 통해 확인할 수 있었다(Table 5).

4. 토 의

서식지 분류별 비교

서식지 분류에서 가장 큰 차이를 보이는 해조류는 현장조사 결과 14.9%로 나타났지만 위성영상 분석에 의한 분류에는 포함되지 않았다. 위성영상 분석에 대한 연구에 따르면 해조류 서식지는 분포 범위가 과소평가 되거나, 잘못 해석될 가능성이 크고 감지하기 어렵다고 보고되고 있다(Mumby et al. 1997; Hochberg and Atkinson 2003). 이 연구에서는 해조류 출현빈도가 92.2%로 전체 조사지역에서 전반적으로 출현하고 있지만, 분포 정도가 소규모이기 때문에 픽셀 $1.8 \text{ m} \times 1.8 \text{ m}$ 를 하나의 서식지로 나타내는 Worldview-2 위성영상 분석에서는 감지하지 못하였다. 또한 해조류 서식지에는 갈조류, 홍조류, 녹조류, 석회조류 등 다양한 분류군이 포함되어 있고 색상이 다양하여 위성영상 분석에서 이를 분류하기 어려웠을 것으로 판단된다.

산호초 분포에 있어서 현장조사에 따르면 해안선 가까운 지역에는 산호초가 분포하지 않았지만 위성영상 분석에 의한 분포도에서는 간헐적으로 산호가 분포하고 있는 것으로 분석되었기 때문에 전체 피도가 10.4% 과대평가된 것으로 생각된다. 그리고 리프 평원에는 모래 기질위에 연산호와 돌산호가 패치(patch) 형태로 분포하고 있지만 위성영상 분석에서는 이 지역을 산호 서식지로 분류하기 때문에 산호 분포는 과대평가되고, 상대적으로 모래 분포는 과소평가된 것으로 판단된다. 이처럼 위성영상 분석에서 연산호와 돌산호가 따로 구분이 되지 않은 이유는 이 지역에 우점하는 산호류의 형태와 색상이 유사하기 때문인 것으로 판단된다. 이 지역에 우점하는 돌산호 *Acropora nobilis*와 *Porites cylindrica*는 가지형태로 색상은 각각 옅은 갈색과 짙은 노란색 계열을 나타내고, 우점하는 연산호 *Alcyonium* sp. 역시 가지형태로 옅은 갈색을 띠고 있기 때

문에 우점종의 색상과 형태가 유사하여 위성영상에서는 세분화하여 구분하기는 어려웠던 것으로 추정된다. 이는 Hochberg (2011)의 연구에서도 확인할 수 있는데, 위성영상을 이용하여 세분화된 산호 분포도를 작성하기 위해 산호를 색상 특성에 따라 구분하고 있다. 그러나 조사지역에서 우점하는 3종(*A. nobilis*, *P. cylindrica*, *Alcyonium* sp.)은 Hochberg (2011)가 제시한 갈색산호(brown coral)로 분류되기 때문에 이번 연구의 위성영상 분석에서도 연산호와 돌산호 구분에는 한계가 있었던 것으로 판단된다.

현장조사에서 리프 언덕과 경사면을 포함한 리프 가장자리에서는 잘피가 분포하지 않고 산호와 죽은 산호파편이 주로 분포하였다. 일반적으로 잘피는 모래기질에서 서식하기 때문에 산호파편과 산호초로 형성된 지역에서는 생존하기 어렵다. 그러나 위성영상 분석에서 이 지역에 잘피가 분포하는 것으로 나타난 이유는 산호와 잘피는 서로 다른 서식지이지만 수심에 따라 수중 및 표층 반사도가 유사하여 동일한 서식지로 분류될 수 있기 때문이다. 이 지역에서 실시된 광특성 조사에 따르면 잘피 지역에서 확보한 수중 및 표층 반사도 스펙트럼이 돌산호와 매우 비슷한 양상을 가지는 것으로 나타났다(Min et al. 2010).

조사방법에 따른 해석

일반적으로 Landsat-7 (해상도 20 m)에서 5-10개 서식지 분류로 분석할 때 정확성이 56%이며, IKONOS (해상도 4 m)에서 5-9개 서식지 분류에 대한 정확성은 64-74%이다(Mumby and Edwards 2002; Andréfouët et al. 2003; Joyce et al. 2004). 웨노섬 연안 Worldview-2 위성영상 분석으로 작성한 서식지 분포도 정확성은 65.2%로 다른 연구와 유사한 수준으로 나타났다. 그러나 현장 조사 결과와 상대적인 비교에서 확인된 바와 같이 특정 서식지 분류에서 과대 또는 과소평가 되거나 위성영상 분석에서는 감지가 어려운 분류가 존재하는 것으로 나타났다.

이와 같이 두 방법에 의한 서식지 분포 결과에서 차이가 발생한 이유는 첫째, 서식지 분류에 차이가 있었기 때문이다. 이 연구에서는 위성영상 분석 결과에 해조류 서식지가 감지되지 못한 것이 다른 서식지 분포에 영향을 준 것으로 추정된다. 둘째, 두 방법의 기본 단위가 되는 규모(scale)가 다르기 때문이다. Worldview-2 위성영상은 공간 해상도가 최소한 1.8 m × 1.8 m를 하나의 서식지로 구현할 수 밖에 없는 반면, 현장조사는 1.0 m × 1.0 m 방형구내에 분포하는 다양한 서식지 형태로 세분화하여 표현할 수 있기 때문이다. 셋째, 해저지형에 따라 수심이 다르기 때문에 빛의 반사도에 의해 결정되는 위성영상 분석에서 동일한 서식지가 지형과 수심에 따라 다르게 분류되거나, 서로 다른 서식지가 동일하게 분류되었기 때문이다. 따라서 이

와 같은 원인을 개선하여 빠른 시간에 서식지 변동을 감지하기 위해서는 위성영상 분석에 현장조사 결과를 적용할 수 있는 표준화된 방법이 필요하다.

분류 기준 및 통합 방안 제시

현장조사에 의한 서식지 분포와 위성영상 분석에 의한 서식지 분포 조사방법은 각각 장단점을 가지고 있으며, 가장 효율적인 방법은 통합된 연구를 수행하는 것이다. 이를 위해 현장조사에 적용된 서식지 분류와 위성영상 분석에 적용된 서식지 분류를 통일하여 분포범위를 비교하는 연구가 수행되었다(Joyce et al. 2004; Roelfsema and Phinn 2009; Scopéltis et al. 2009, 2010). 두 방법에 대한 통합은 최근에 진행되기 시작하였는데, Roelfsema et al. (2010)은 최적화된 서식지 분포도 작성을 위해서는 위성영상 분석에 해저 지형 뿐만 아니라 서식지를 구성하는 저서 생물 군집 수준에서 분석된 현장조사 결과를 적용시키는 방안을 제시하였다. 이후, 이 방법은 어류 자원 관리를 위한 서식지 평가에 적용되기도 하였다(Knudby et al. 2011).

이번 연구에서는 두 방법에 의한 서식지 분포를 정밀하고, 정량적으로 비교하였고, 그 결과를 바탕으로 웨노섬 연안 서식지 분포도를 작성할 때, 위성영상 분석에 현장조사 결과를 적용하여 정확성을 높일 수 있는 통합된 방안을 제안하고자 한다. 첫째, 위성영상 분석을 위해서는 해상도를 고려하여 단위 조사 면적을 결정하고, 선행된 현장조사에 의해 분류된 서식지 기준을 최대한 활용하여야 한다. 즉, 위성영상의 공간 해상도를 고려하여 현장조사 방형구 크기를 결정하고, 하나의 픽셀에서 서식지 분류를 세분화하여 표현할 수 있도록 분류 기준을 다양화하는 것이다. 세분화된 서식지 분류는 이전 연구에서 제시된 바 있고, 이는 각 조사지역의 현장조사 결과를 반영하고 있다(Scopéltis et al. 2010; Knudby et al. 2011). 특히, Knudby et al. (2011) 연구에서 대상 해역인 피지 쿠부라우(Kubulau) 지역에서 세분화된 33개의 분류 기준을 적용하여 위성영상 분석을 실시한 결과, 정확성이 66.6%로 나타났다. 쿠부라우 지역은 웨노섬 연안 서식지와 유사한 패턴을 나타내고 있지만 분포범위에서 차이가 있기 때문에 이번 연구에서 실시한 현장조사 결과가 반영되어야 한다. 따라서 이 기준을 참고하여 현장조사 결과를 적용한 세분화된 새로운 분류 기준을 제시하였다(Table 7). 세분화된 서식지 분류를 적용하여 위성영상 분석을 실시하면, 과대 또는 과소 평가 되는 결과를 최소화 할 수 있을 것으로 기대된다.

둘째, 위성영상 분석에서 지형과 수심을 고려한 단계적 분석이 진행되어야 한다. 분석 과정은 1차적으로 리프 형태를 파악하고, 수심과 해저면을 고려하여 지형학적인 수준(geomorphologic scale)에서 지형을 분류한다. 다음으로

Table 7. Detailed classification scheme based on *in situ* survey data obtained in this study (modified from Knudby et al. 2011)

First Level	Second Level	Description
Sand (S)	Sand dominant	> 70% Sand
	Sand and Algae	> 20% Algae
	Sand and Seagrass	> 20% Seagrass
Seagrass (SG)	Seagrass dominant	> 70% Seagrass
	Seagrass and Algae	> 20% Algae
	Seagrass and Sand	> 20% Seagrass
Coral (C)	Hard Coral dominant	> 50% Hard Coral
	Hard Coral and Sand	> 20% Sand
	Hard Coral and Algae	> 20% Algae
	Hard Coral and Rubble	> 20% Rubble
	Hard Coral and less Soft Coral	> 20% Soft Coral
	Soft Coral dominant	> 50% Soft Coral
	Soft Coral and Sand	> 20% Sand
	Soft Coral and Algae	> 20% Algae
	Soft Coral and less Hard Coral	> 20% Hard Coral
Rubble (R)	Rubble dominant	> 70% Rubble
	Rubble and Sand	> 20% Sand
	Rubble and Algae	> 20% Algae
Algae (A)	Algae dominant	> 70% Algae
	Algae and Seagrass	> 20% Seagrass
	Algae and Coral	> 20% Coral
	Algae and Rubble	> 20% Rubble

분류된 각 지형 특성에 적합한 서식지 분류 기준(benthic habitat scale)을 적용하여 위성영상 분석을 실시한다(Roelfsema et al. 2010; Knudby et al. 2011; Lyons et al. 2011). 일반적으로 거초 형태 섬의 연안에는 리프 가장자리까지 리프 평원, 언덕, 경사면으로 연결되는 지형학적인 특성을 가지고 있으며, 서식지 분포도 작성을 위해 이와 같은 단계별 분류 기준이 적용되고 있다(Roelfsema et al. 2010; Knudby et al. 2011). 웨노섬 연안 또한 동일한 지형학적인 특성을 나타내고 있기 때문에 단계별 분류를 참고하여 현장조사 결과가 반영된 기준을 제시하였다(Fig. 5). 각 지형에 적합한 서식지 분류를 적용하여 위성영상 분석에 활용한다면 오분류를 최소화 할 수 있을 것으로 판단된다. 이와 같이 제시된 방안들이 서식지 분포도 작성을 위한 위성영상 분석에 활용된다면, 향후에 광범위하게 발생 할 수 있는 서식지 분포 변동을 신속하고 정확하게 감지할 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

이 연구는 한국해양과학기술원 기관고유사업(PE98962, 적도태평양 연구인프라 구축 사업)과 해양수산부 국가연구개발사업(PM57562, 산호초 해역 해양생물시료 확보 및 태평양해양생물시료관 운용)의 일환으로 수행되었습니다.

Fig. 5. Hierarchical class structure diagram of habitat mapping (SG: Seagrass, S: Sand, A: Algae, SC: Soft Coral, HC: Hard Coral, R: Rubble) (modified from Roelfsema et al. 2010)

참고문헌

- Andréfouët S, Kramer P, Torres-Pulliza D, Joyce KE, Hochberg EJ, Garza-Pérez R, Mumby PJ, Riegl B, Yamano H, White WH, Zubia M, Brock JC, Phinn SR, Naseer A, Hatcher BG, Müller-Karger FE (2003) Multi-site evaluation of IKONOS data for classification of tropical coral reef environments. *Remote Sens Environ* **88**:128-143
- English S, Wilkinson CR, Baker C (1994) Survey Manual for Tropical Marine Resources. Australian Institute of Marine Science, Townsville, 390 p
- Green EP, Mumby PJ, Edwards AJ, Clark CD (2000) Remote sensing handbook for tropical coastal management. UNESCO, Paris, 316 p
- Hochberg EJ, Atkinson M (2003) Capabilities of remote sensors to classify coral, algae and sand as pure and mixed spectra. *Remote Sens Environ* **85**:174-189
- Hochberg EJ (2011) Remote Sensing of Coral Reef Processes. In: Zvy D, Noga S (eds) *Coral Reefs: An Ecosystem in Transition*. Springer, pp 25-35
- Jonker M, Johns K, Osbourne K (2008) Surveys of benthic reef communities using underwater digital photography and counts of juvenile corals. Long-term Monitoring of the Great Barrier Reef. Australian Institute of Marine Science, Townsville, 75 p
- Joyce KE, Phinn SR, Roelfsema CM, Neil DT, Dennison WC (2004) Combining Landsat ETM+ and Reef Check classifications for mapping coral reefs: a critical assessment from the southern Great Barrier Reef, Australia. *Coral Reefs* **23**:21-25
- Knudby A, Roelfsema C, Lyons M, Phinn S, Jupiter S (2011) Mapping fish community variables by integrating field and satellite data, object-based image analysis and modeling in a traditional Fijian fisheries management area. *Remote Sens* **3**:460-483
- Kuster T, Jupp DLB (2006) On the possibility of mapping living corals to the species level based on their optical signatures. *Estuar Coast Shelf Sci* **69**:607-614
- Lam K, Shin PKS, Bradbeer R, Randall D, Ku KKK, Hodgson P, Cheung SG (2006) A comparison of video and point intercept transect methods for monitoring subtropical coral communities. *J Exp Mar Biol Ecol* **333**:115-128
- Lyons M, Phinn S, Roelfsema C (2011) Integrating Quickbird Multi-Spectral Satellite and Field Data: Mapping Bathymetry, Seagrass Cover, Seagrass Species and Change in Moreton Bay, Australia in 2004, 2007. *Remote Sens* **3**:42-64
- Min JE, Ryu JH, Choi JK, Park HS (2010) Coral reef habitat monitoring using high-spatial satellite imagery: A case study from Chuuk lagoon in FSM. *Ocean and Polar Res* **32**(1):53-61
- Mumby PJ, Edwards AJ (2002) Mapping marine environments with IKONOS imagery: Enhanced spatial resolution can deliver greater thematic accuracy. *Remote Sens Environ* **82**:248-257
- Mumby PJ, Green EP, Edwards AJ, Clark CD (1997) Coral reef habitat mapping: how much detail can remote sensing provide? *Mar Biol* **130**:193-202
- Palandro DA, Andréfouët S, Hu C, Hallock P, Müller-Karger FE, Dustan P, Callahan MK, Kranenburg C, Beaver CR (2008) Quantification of two decades of shallow-water coral reef habitat decline in the Florida Keys National Marine Sanctuary using Landsat data (1984-2002). *Remote Sens Environ* **112**:3388-3399
- Roelfsema C, Phinn S (2009) A Manual for Conducting Georeferenced Photo Transects Surveys to Assess the Benthos of Coral Reef and Seagrass Habitats. Centre for Remote Sensing & Spatial Information Science School of Geography, Planning & Environmental Management. University of Queensland, Australia
- Roelfsema C, Phinn S, Comley J (2007) Mapping benthic habitats on Fijian coral reefs: Evaluating combined field and remote sensing approaches. In: *Proceedings of the Asian Conference on Remote Sensing. The 28th Asian Conference on Remote Sensing*, Kuala Lumpur, Malaysia, pp 12-16
- Roelfsema C, Phinn S, Jupiter S, Comley J, Beger M, Paterson E (2010) The application of object based analysis of high spatial resolution imagery for mapping large coral reef systems in the West Pacific at geomorphic and benthic community spatial scales. In: *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Honolulu, Hawaii, USA, 25-30 July 2010
- Scopéltis J, Andréfouët S, Phinn S, Arroyo L, Dalleau M, Cros A, Chabanet P (2010) The next step in shallow coral reef monitoring: Combining remote sensing and in situ approaches. *Mar Pollut Bull* **60**:1958-1968
- Scopéltis J, Andréfouët S, Phinn S, Chabanet P, Naim O, Tourrand C, Done T (2009) Changes of coral communities over 35 years: Integrating *in situ* and remote-sensing data on Saint-Leu Reef (la Réunion, Indian Ocean). *Estuar Coast Shelf Sci* **84**:342-352
- Short FT, Short CA (1984) The Seagrass Filter: Purification of Estuarine and Coastal Water. In: Kennedy VS (ed) *The Estuary as a Filter*. Academic Press, Orlando, pp 395-413

-
- Smith VE, Togers RH, Reed LE (1975) Automated mapping and inventory of Great Barrier Reef zonation with Landsat data. In: Ocean 75 conference record. Institute of Electrical and Eletronics Engineers, Inc, New York, pp 775-780
- Stevenson JC (1988) Comparative ecology of submersed grass beds in freshwater, estuarine and marine environments. *Limnol Oceanogr* **33**:867-893
- Wilkinson C (2008) Status of Coral Reef of the World: 2008. Global Coral Reef Monitoring Network and Reef and Rainforest Research Centre, Townsville, Australia
- Yamano H, Tamura M (2004) Detection limits of coral reef bleaching by satellite remote sensing: simulation and data analysis. *Remote Sens Environ* **90**:86-103
-
- Received Sep. 16, 2013*
Revised Oct. 22, 2013
Accepted Nov. 17, 2013