

제주 남부해역 수온 수직구조의 공간분포 특성 파악

윤동영¹ · 최현우^{1*}

Spatial Distribution Characteristics of Vertical Temperature Profile in the South Sea of Jeju, Korea

Dong-Young YOON¹ · Hyun-Woo CHOI^{1*}

요 약

공간적으로 3차원의 특성을 지닌 해양에서 수직적인 수온 자료의 특성을 가시화하기 위해서는 각 수심층별 수평 수온분포도와 같은 2차원적 주제도나 3차원적 공간보간을 통한 입체 모델을 사용하게 된다. 이러한 방법은 해양 현상을 시각적으로 이해하는데 유용하지만, 수직적 수온분포의 공간 패턴 분석이나 수직적 수온의 특성과 다른 해양 요인(해양화학, 해양생물, 기후변화 등)과의 관계분석에는 한계가 있다. 따라서 본 연구는 수온 수직구조의 주요 파라미터인 혼합층의 깊이, 최대수온구배, 수온약층의 두께를 추출하는 알고리즘을 이용하여, 수온의 수직구조 특성을 정량화함으로써 제주남부 해역의 수온 수직구조의 공간분포 특성을 밝히고자 한다. 이를 위해 수온 수직구조를 대표하는 세 가지 파라미터에 대한 공간분포지도 제작을 비롯해 공간자기상관 지수(Moran's I)를 계산하였다. 아울러, 세 가지 파라미터에 대한 군집분석을 수행하여 제주 남부해역을 4개 지역으로 그룹핑하고, 각 지역에 대한 수직 수온구조의 특성을 정의하였다.

주요어 : 수직 수온구조, 공간분포, 공간적 자기상관, 군집분석, 제주 남부해역

ABSTRACT

To visualize the characteristics of vertical seawater temperature data, in the ocean having 3D spatial characteristics, 2D thematic maps like horizontal seawater temperature distribution map at each depth layer and 3D volume model using 3D spatial interpolation are used. Although these methods are useful to understand oceanographic phenomena visually, there is a limit to analyze the spatial pattern of vertical temperature distribution or the relationship between vertical temperature characteristics and other oceanic factors (seawater chemistry, marine organism,

2012년 10월 22일 접수 Received on October 22, 2012 / 2012년 12월 7일 수정 Revised on December 7, 2012 / 2012년 12월 14일 심사완료 Accepted on December 14, 2012

1 한국해양과학기술원 해양과학데이터센터 Oceanographic Data & Information Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology

* Corresponding Author E-mail : hwchoi@kiost.ac

climate change, etc). Therefore, this study aims to determine the spatial distribution characteristics of vertical temperature profiles in the South Sea of Jeju by quantifying the characteristics of vertical temperature profiles by using an algorithm that can extract the thermocline parameters, such as mixed layer depth, maximum temperature gradient and thermocline thickness. For this purpose spatial autocorrelation index (Moran's I) was calculated including mapping of spatial distribution for three parameters representing the vertical temperature profiles. Also, after grouping study area as four regions by using cluster analysis with three parameters, the characteristics of vertical temperature profiles were defined for each region.

KEYWORDS : *Vertical Temperature Profile, Spatial Distribution, Spatial Autocorrelation, Cluster analysis, South Sea of Jeju*

서론

공간적으로 3차원의 특성을 지닌 해양의 수온에 관한 연구를 위해 일반적으로 수온의 수평분포도나 수직분포도를 제작하여 탐색적인 분석에 사용한다. 하지만 수온의 수직구조의 특성에 대한 시·공간 변동패턴 분석과 다른 해양 요인(해양화학, 해양생물, 기후변화 등)과의 관계분석은 수직구조를 정량화시키지 못함으로써 연구에 한계를 지니고 있다.

해양에서 해수를 온도에 따라 수직적으로 구분하면 혼합층, 수온약층, 심해층 등 세 개의 층으로 구분된다. 혼합층은 바람에 의한 해수의 수직적 혼합으로 수심에 따른 수온의 변화가 없는 층이며, 심해층은 열이 전달되지 않아 수온이 낮은 상태로 변화가 거의 없는 지역이다. 상부의 따뜻한 혼합층과 하부의 차가운 심해층 사이에 위치하는 수온약층은 아래로 내려갈수록 온도가 급감하는 층이다 (Knauss, 1978).

이러한 세 가지 층중에서 혼합층은 대기와 해양 사이의 질량, 운동량, 에너지, 열 등을 교환할 뿐만 아니라, 혼합층 밑의 풍부한 영양소를 섞어주어 생물학적으로 중요한 역할을 한다. 이러한 이유로 혼합층의 깊이와 공간분포에 대한 연구가 꾸준히 이루어지고 있다 (Martin, 1985; Kara *et al.*, 2000; De

Boyer Montegut *et al.*, 2004; Lim *et al.*, 2012). 또한 해양순환, 해양생태학, 수중음향학 등에 중요한 역할을 하는 수온약층(Zhang *et al.*, 2010)의 구조를 정량적으로 추출하여 공간적인 분포 특성을 파악하고자 하는 연구도 지속적으로 수행되고 있다(Hastenrath and Merle, 1987; Chu, 1995; Prasad and Bahulayan, 1996; Chu *et al.*, 1997; Park and Chu, 2007). 한편, 심해층은 연중 수온 변화가 거의 없기 때문에 심해층에 대한 연구는 다른 수층에 비하여 미흡하나, 최근 심해저 자원의 개발(해양수산부, 2001; 김현주, 2001)로 심해층에 대한 중요성이 대두되고 있는 실정이다.

이와 같이 혼합층과 수온약층의 두께를 추출하고 이의 공간적인 분포현황을 파악하고자 하는 연구가 수행되어왔으나, 혼합층과 수온약층을 포함한, 수온의 수직구조 전체를 정량적으로 추출하여 공간적인 분포 특성을 파악하고자 하는 연구는 미흡하였다. 우리나라 주변해역을 대상으로 수온의 수직구조 전체를 조사한 연구로는, 동해를 대상으로 한국해양과학기술원(1987)이 경험적 직교함수(empirical orthogonal function: EOF) 방법을 적용하여 수온의 수직구조함수를 산출한 다음 각각의 함수가 지니는 물리적 의미를 부여한 바 있다. 또한 나정열 등(1991)은 수온관측 정점별 직교함수 분석을 적용하여 동해 중서부해역에

대한 수온 수직구조 함수의 시·공간적 변동성을 파악한 바 있다. 하지만 혼합층, 수온약층, 심해층의 세 가지 층으로 구성된 수온의 수직구조를 정량화하지 못함에 따라 수온 수직구조의 전체적인 공간분포 특성을 파악하기에는 한계가 있었다.

그러나 최근 윤동영과 최현우(2012)가 수온약층 추출 알고리즘을 사용하여 수온의 수직구조를 정량화 하는 방법을 제시함으로써, 수온의 수직구조 전체의 공간적인 분포 특성을 파악할 수 있는 기틀을 마련한 바 있다. 따라서 본 연구에서는 앞서 개발한 수온약층 추출 알고리즘을 사용하여 하계 제주 남부해역을 대상으로 수온 수직구조를 대표하는 주요 파라미터인 혼합층의 깊이, 최대수온구배, 수온약층의 두께를 정량적으로 추출하여 수온 수직구조의 공간분포 특성을 파악하고자 하였다. 또한, 세 가지 파라미터를 이용한 군집분

석을 통해 제주 남부해역을 그룹화 하고 수온 수직구조의 지역별 특성을 비교하고자 하였다.

연구지역 및 연구 자료

본 연구의 대상 지역은 제주 남부해역 (32° N~34° N, 123° E~128° E)으로 선정하였다(그림 1). 이 해역은 하계에 고온 고염의 쓰시마 난류가 지나는 해역으로, 계절수온약층(seasonal thermocline)이 존재함에 따라 수온의 수직구조가 세 가지 층(혼합층, 수온약층, 심해층)으로 형성되는데 적합한 지역이다. 또한, 이 지역은 중국의 양자강에 의한 담수 유입의 영향을 받을 뿐 아니라, 계절풍의 강도와 해저지형의 차이로 인해 다양한 형태의 수온 수직구조가 존재할 것으로 추정되었다.

연구 자료로는 17년간(1994~2010) 하계

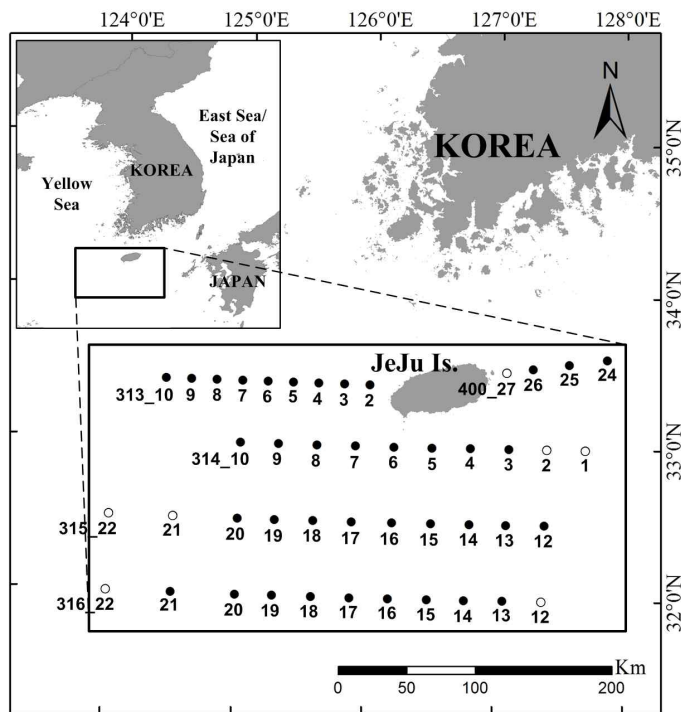


FIGURE 1. 연구지역인 제주 남부 해역(조사정점은 국립수산과학원의 정선해양관측 지점임)

(8월)의 표준 수층(표층, 10, 20, 30, 50, 75, 100, 125m)에서 관측된 45개 정점의 정선해양관측자료(국립수산과학원, 2012) 중 수온자료를 이용하였다. 이 중 수온약층 형성 유무의 판단을 탐지하는 기법(윤동영과 최현우, 2012)을 적용하여 혼합층, 수온약층, 심해층이 존재한다고 판단되는 시기가 17년 중 5년 미만인 정점 314_01, 314_02, 315_21, 315_22, 316_12, 316_22, 400_27을 제외한 나머지 38개 정점을 분석 대상으로 선별하였다(그림 1).

연구 방법

수집된 정선해양관측 자료는 수심 층의 간격이 넓고 균등하지 않아(표준 수심 층) 수온 수직구조의 주요 파라미터를 추출하는데 있어서 적절치 못하였다. 따라서 보간 방법 중 monotone cubic interpolation(Fritsh and Carlson, 1980) 방법으로 표준 수심 층의 수온자료에 대한 보간을 수행하여 1m 간격 수심의 수온 자료 셋을 제작하였다. 또한, 수온의 수직구조를 대표하는 파라미터를 추출하기 위해 수심 1m 간격의 수온구배(ΔT °C/m) 값을 계산하였다.

수온약층의 형성 유무는 각 수층마다의 수온구배 임계치를 설정하여 판단하였으며, 세 가지 층으로 형성되었다고 판단된 수온의 수직구조에 대한 주요 파라미터인 혼합층의 깊이(mixed layer depth: MLD), 최대수온구배(maximum temperature gradient: maximum ΔT), 수온약층의 두께(thickness of thermocline)를 추출하였다. 17년 중 수온약층이 형성되었다고 판단된 시기의 주요 파라미터에 대한 각 정점별 평균값이 본 연구의 주된 분석 자료이며, 수온 수직구조의 형성 유무와 주요 파라미터 추출 방법은 윤동영과 최현우(2012)가 한국 남부해역을 대상으로 개발한 수온약층 탐지 및 추출 알고리즘을 사용하였다.

주요 파라미터에 대한 서로간의 상관성을

일차적으로 분석하였으며, ArcGIS 9.3의 IDW(inverse distance weighted) 공간보간 기능을 이용하여 세 가지 파라미터의 래스터 데이터를 제작한 후 공간분포 특성을 파악하였다. 또한, 해양환경의 공간분포 패턴 분석에 적용(최현우 등, 2007)한 바 있는, 공간자기상관(spatial autocorrelation) 지수인 Moran's I (Moran, 1948)를 이용하여 군집 정도를 파악하였다. 공간자기상관 계산 시 한 정점으로 부터 가장 이웃한 거리에 있는 정점까지의 거리 중 가장 먼 거리가 약 48km임에 따라 이웃한 정점 수가 하나 이상 포함되도록 임계거리(threshold distance)를 50km로 설정하고, 역거리 가중(inverse distance weighted) 방법과 정점 간 유클리드 거리(euclidean distance)로 측정하였다. 아울러 해양환경인자인 표층수온(sea surface temperature: SST)과 수심이 수온의 수직구조 형성에 미치는 영향도 확인하였다.

조사정점들 간의 유사성을 찾아 지역적인 분류를 하기 위해 세 가지 주요 파라미터를 표준화한 군집분석을 수행하였다. 각 파라미터들 간의 차이는 euclidean distance로 계산하였고, unweighted pair-group average 방법으로 군집화하여, 수온 수직구조의 지역별 특성을 비교하였다. 제반 통계적 처리는 XLSTAT 2011(AddinSoft™) 통계 패키지를 이용하였다.

표준 수심층의 수온을 1m 간격의 수온자료로 변환하는 작업과 수온의 수직구조 주요 파라미터를 추출하는 처리과정을 자동화하기 위해 Microsoft Visual C++ 6.0을 이용하여 제작한 프로그램을 사용하였다. 수온 자료 수집에서부터 수온의 수직구조 파라미터 추출과 공간분포 특성 분석에 이르는 제반 연구 절차는 그림 2와 같다.

본 연구에서 핵심적으로 사용된 수온의 수직구조 파라미터 추출 기법은 그림 3의 a)와 같이 쌍곡탄젠트함수(hyperbolic tangent function)의 구조가 수온의 수온약층 구조와 유사하다는 점에 착안하여, 그림 3의 b)와 같

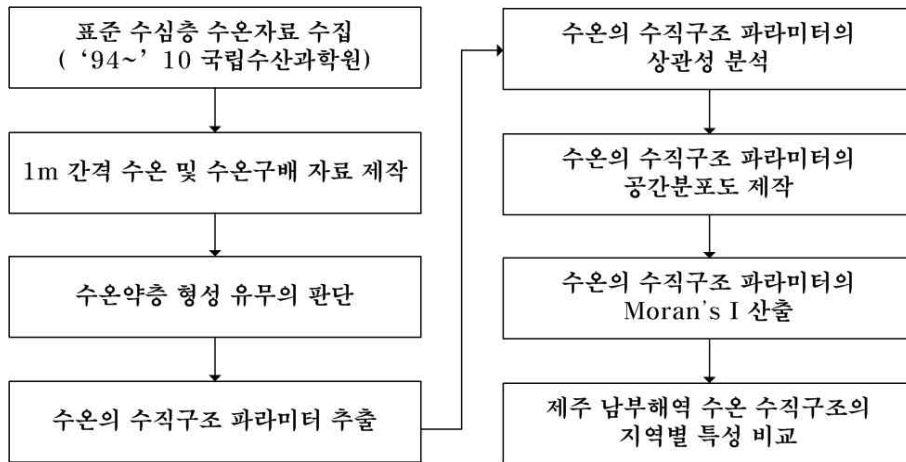


FIGURE 2. 연구 절차

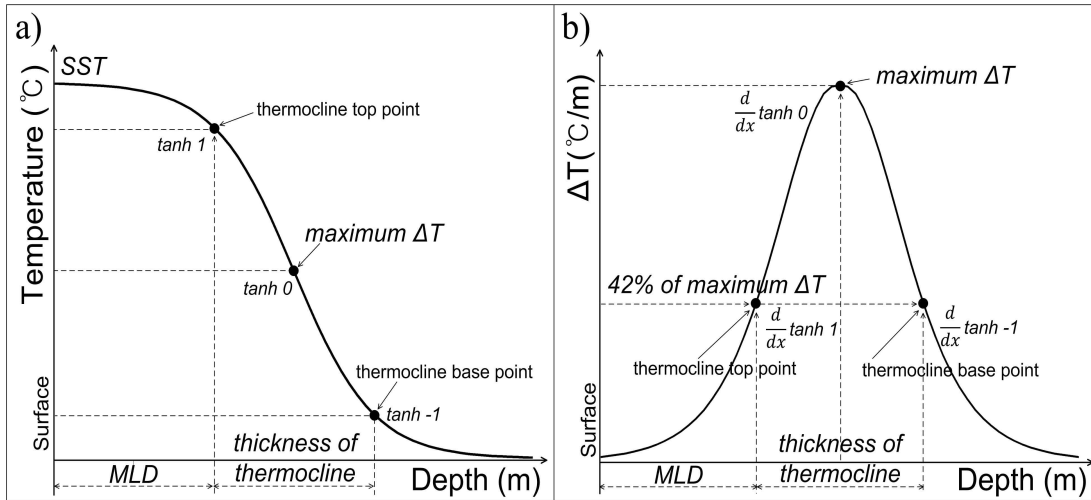


FIGURE 3. 수온 수직구조의 파라미터 추출에 이용된 a) 쌍곡탄젠트 함수의 구조와 b) 미분된 쌍곡탄젠트 함수의 구조 (윤동영과 최현우, 2012)

이 미분된 쌍곡탄젠트함수(differential hyperbolic tangent function)의 개념을 수온구배의 수직구조에 도입한 것이다. 미분된 쌍곡탄젠트함수의 x 성분은 수심, y 성분은 ΔT 를 의미하며 쌍곡탄젠트함수 1의 미분 값인 0.42를 수온약층의 윗점과 아랫점으로 정의하여 수온 수직구조의 파라미터를 추출하였다 (윤동영과 최현우, 2012).

결과 및 고찰

본 연구에서는 제주 남부해역 수온 수직구조의 공간분포 특성을 파악하기 위해 통계기법과 GIS를 적용하였다. 우선, 수온약층 추출 알고리즘을 사용하여 수온의 수직구조를 대표할 수 있는 파라미터를 추출하였다. 각각의 파라미터에 대한 기술통계량 및 서로간의 상관성을 분석하였으며, 파라미터별 공간분포지

TABLE 1. 수온의 수직구조 파라미터의 기술통계량

Parameter	Min.	Max.	Mean	S.D.
Mixed layer depth(m)	11.00	24.00	14.58	2.44
Maximum ΔT ($^{\circ}\text{C}/\text{m}$)	0.70	1.60	1.07	0.24
Thickness of thermocline(m)	8.00	15.18	12.47	1.87

도를 제작하고 Moran's I를 산출하여 전반적인 제주 남부해역의 수온 수직구조의 특성을 파악하였다. 또한, 조사정점들 간의 유사성을 찾아 지역적인 분류를 하기 위해 3가지 파라미터를 변수로 두어 군집분석을 수행한 후, 수온 수직구조의 지역별 특성을 비교 분석하였다.

1. 제주 남부해역 수온 수직구조의 전반적인 특성

추출된 각 파라미터의 기술통계량 및 서로 간의 상관성을 일차적으로 산출하였다. 표 1과 같이 기술통계량에 의하면, 하계 제주남부해역의 혼합층의 깊이와 수온약층 두께 평균은 각각 14.58m와 12.47m로 혼합층의 깊이가 수온약층의 두께보다 크게 나타났다. 수온약층을 형성하는 최대수온구배의 조건은 0.70~1.60 $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 범위였으며, 평균값은 1.07 $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 로 나타났다. 혼합층 깊이의 범위는 11~24m, 수온약층 두께의 범위는 8~15m로 나타났다. Park and Chu(2007)가 1992년과 1993년 9월에 동중국해를 대상으로 연구한 결과(혼합층의 깊이: 10~30m, 수온약층의 두께: 40~80m)와 비교하면, 혼합층의 깊이는 서로 유사하였으나, 수온약층의 두께는 큰 차이를 보였다. 또한, 표준편차는 혼합층의 깊이 2.44m, 최대수온구배 0.24 $^{\circ}\text{C}/\text{m}$, 수온약층의 두께 1.87m로 나타남에 따라 본 연구지역 내에서 지역별 수온의 수직구조에 대한 차이가 있음을 확인하였다.

이러한 두 연구의 결과를 서로 비교하기에

는 방법상의 차이로 다소 어려움이 있지만, 혼합층의 깊이 범위는 제주남부해역을 포함하는 동중국해내에서 지역적으로 큰 차이를 보이지 않는 반면, 수온약층의 두께 범위는 지역적으로 큰 차이가 있음을 추정할 수 있다. 따라서 추후 본 연구의 대상 지역을 확장하여 이러한 가설을 증명 또는 확인할 필요도 있다.

3가지 파라미터에 대한 상호 상관성 분석 결과는 표 2와 같이 모든 인자가 유의수준 0.05에서 상관성이 있는 것으로 나타났다. 혼합층의 깊이와 최대수온구배는 음의 상관관계, 수온약층 두께와는 양의 상관관계를 보여 혼합층이 깊어지면 최대수온구배는 작아지고, 수온약층의 두께는 두꺼워지는 것으로 나타났다. 최대수온구배와 수온약층 두께는 음의 상관관계를 보여 최대수온구배가 커지면 수온약층의 두께는 얇아지는 것을 확인하였다.

수온의 수직구조를 구성하는 3가지 주요 파라미터에 대한 주제도를 그림 4와 같이 제작하여 각각의 공간분포 특성을 파악하였다. 각각의 속성별 구간은 3가지 등급(전체 자료의 0~30%, 30~70%, 70~100%)으로 정의하였으며, IDW 공간보간 기능을 사용하여 1 × 1km 공간 격자규모로 제작하였다. 결과에 따르면, 혼합층의 깊이는 제주도를 기준으로 서쪽보다 동쪽이 깊게 나타나는 경향(그림 4의 (a))을 보였으나, 최대수온구배는 동쪽보다 서쪽이 높게(그림 4의 (b)) 나타났다. 수온약층의 두께는 공간적으로 뚜렷한 분포 패턴을 보이지 않았지만, 북서쪽과 남서쪽 지역이 북

TABLE 2. 수온 수직구조의 세 가지 주요 파라미터들 간의 상관 관계(N=38, p-value: **<0.01, *<0.05)

	Maximum ΔT	Thickness of thermocline
Mixed layer depth	-0.492**	0.436**
Maximum ΔT		-0.403*

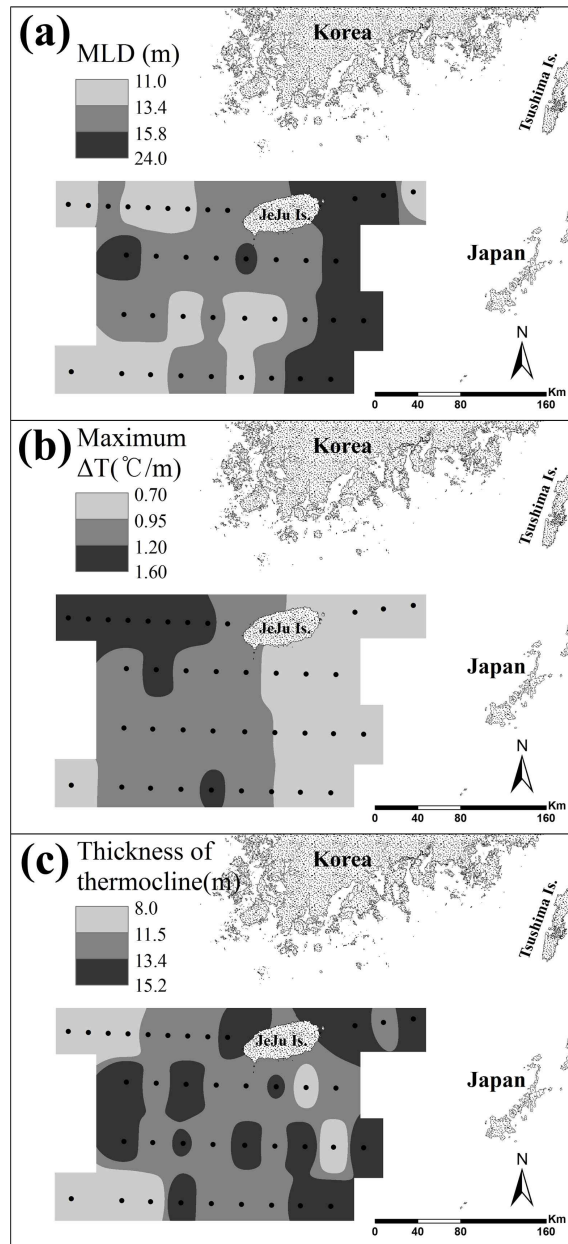


FIGURE 4. 하계(8월) 제주 남부해역에서 수온 수직구조를 형성하는 세 가지 파라미터의 공간분포 패턴

동쪽 지역과 남동쪽 지역과는 뚜렷한 차이를 보였다(그림 4의 (c)). 또한, 3가지 주요 파라미터에 대한 군집성을 파악하고자, Moran's

I를 표 3과 같이 구하여 공간자기상관성을 살펴본 결과 Moran's I의 값이 혼합층의 깊이는 0.30, 최대수온구배는 0.91, 수온약층의 두께

TABLE 3. 수온 수직구조의 세 가지 파라미터의 Moran's I(N=38, Z-score: ***>2.58, **>1.96, *>1.65)

Parameter	Mixed layer depth	Maximum ΔT	Thickness of thermocline
Moran's I	0.30**	0.91***	0.21*

는 0.21로 나타났다. 따라서 혼합층의 깊이와 수온약층의 두께는 약한 군집 패턴을, 최대수온구배는 강한 군집패턴을 보임을 알 수 있다.

아울러 본 연구해역에서 해양환경인자인 표층수온과 수심이 수온 수직구조와 어떤 관계가 있는지 알아보기 위해 그림 5와 같이 표층수온과 수심에 대해 공간보간을 통해 래스터 데이터를 제작하였다. 이러한 환경인자와 수온 수직구조 파라미터들과의 관계는 표 4의 상관관계 분석 결과에서 보는 바와 같이 공간

적으로 표층수온은 제주도를 기준으로 서쪽보다 동쪽에 높게 나타났고(그림 5의 (a)), 수심 또한 서쪽보다 동쪽이 깊게 나타났다(그림 5의 (b)). 상관관계 분석 결과는 유의수준 0.05에서 해양환경인자와 혼합층의 깊이, 수온약층의 두께는 양의 상관관계, 해양환경인자와 최대수온구배는 음의 상관관계를 보였다. 따라서 본 해역에서는 해양환경인자가 수온의 수직구조의 형태와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었다.

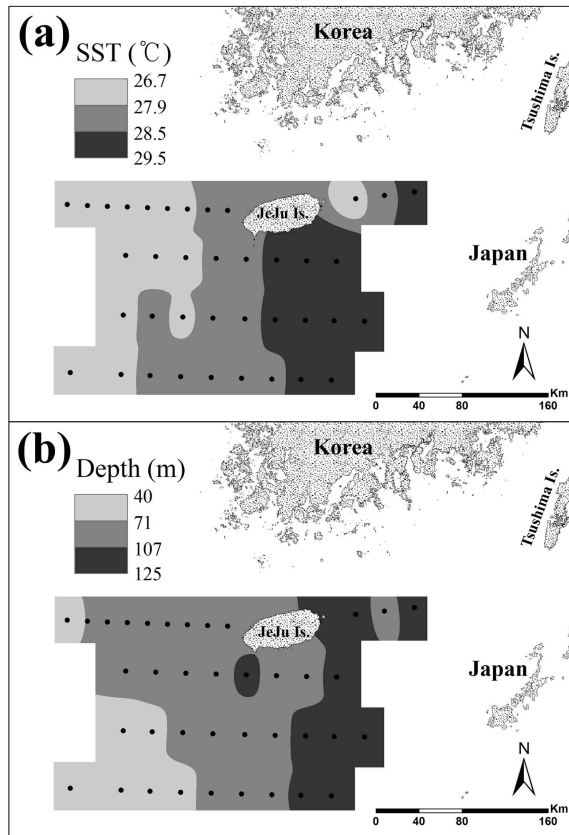


FIGURE 5. 하계(8월) 제주 남부해역의 (a) 표층수온과 (b) 수심의 공간분포도

TABLE 4. 해양환경 인자와 주요 파라미터간의 상관관계 (N=38, p-value: **<0.01, *<0.05)

	SST	Mixed layer depth	Maximum ΔT	Thickness of thermocline
Sea Surface Temperature		0.446**	-0.719**	0.343*
Water Depth	0.698**	0.653**	-0.513**	0.486**

2. 제주 남부해역 수온 수직구조의 지역별 특성

조사정점 사이의 유사성을 찾아 지역적인 분류를 하고, 수온 수직구조의 지역별 특성을 비교하기 위해 수온약층의 세 가지 파라미터

를 변수로 이용하여 군집분석을 수행하였다. 우선, 각 파라미터의 단위가 달라 Z-score로 표준화하였다. 두 집단의 차이는 euclidean distance로 계산하였으며, unweighted

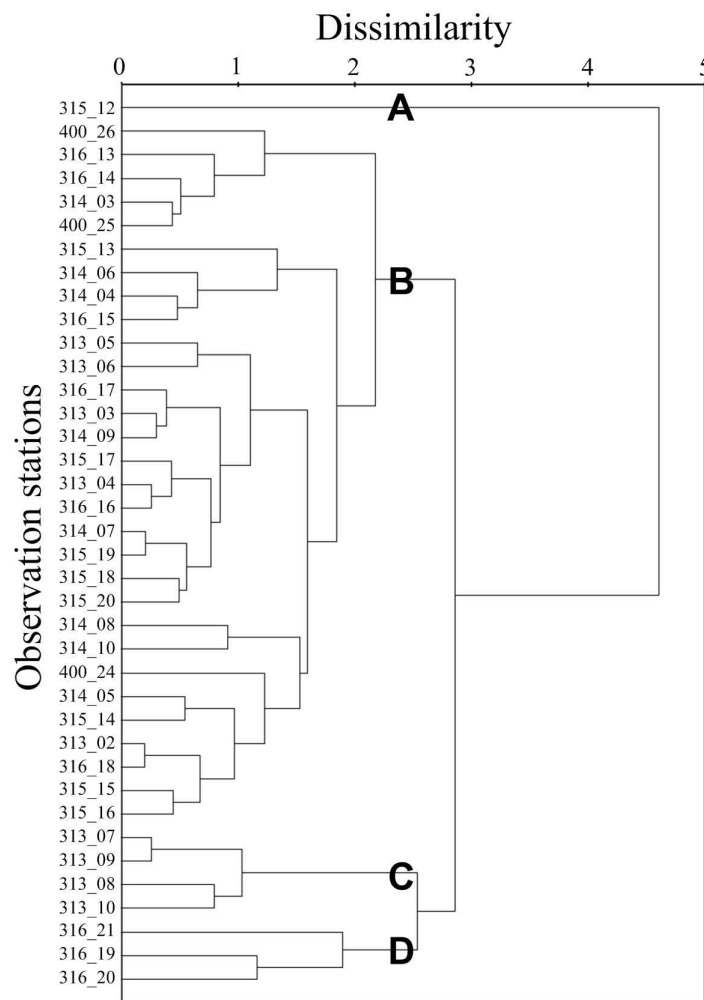


FIGURE 6. 하계(8월) 제주 남부해역 수온의 수직구조를 형성하는 세 가지 파라미터의 군집분석 덴드로그램

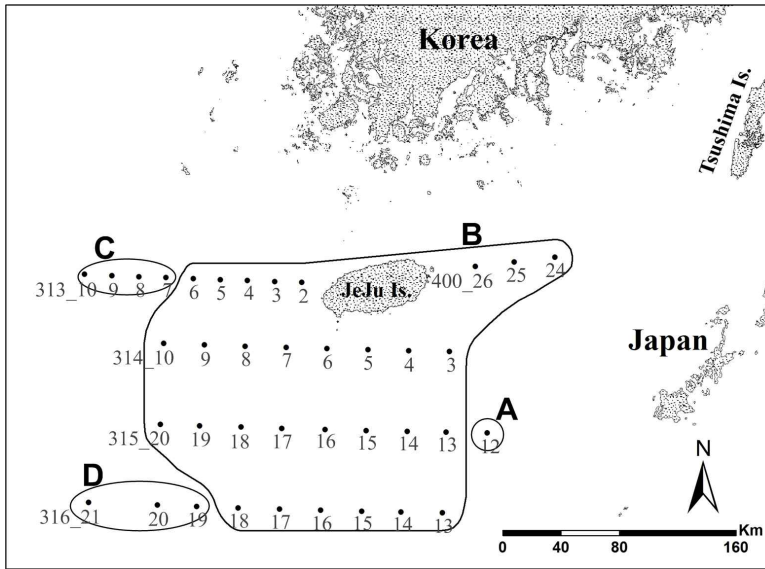


FIGURE 7. 하계(8월) 제주 남부해역 수온의 수직구조 파라미터의 지역별 군집 결과

pair-group average 방법을 사용하여 그림 6과 같이 군집화하였다. 각 조사정점들을 군집한 결과 A, B, C, D의 4개 집단으로 분류되었다. 이러한 군집분석 결과를 공간상에 표현하면 그림 7과 같이 군집 A는 정점 315_12 하나로 지역적으로는 연구해역의 동쪽(일본 방향)이고, 군집 C는 정점 313_07, 08, 09, 10로 연구해역의 북서쪽 지역이며, 군집 D는 정점 316_19, 20, 21로 연구해역의 남서쪽이었다. 한편, 군집 B는 가장 많은 30개 정점으로 제주 남부해역을 대표하였다.

제주 남부해역을 대표하는 B 지역을 기준으로 다른 3개의 지역에 대한 수온 수직구조의 특성을 비교하기 위해 각 지역에 속하는 정점별 세 가지 파라미터의 평균값을 이용하여 그림 8과 같이 각 지역별 특성을 수온 수직구조로 도식화하고, 표 5와 같이 지역별 각 파라미터의 표준화 점수(Z-score)의 평균을 계산하였다. B 지역과 나머지 3개 지역을 비교한 결과 A지역은 혼합층의 깊이가 깊고, 최대수온구배는 작으며, 수온약층의 두께는 두껍게 나타나는 특징을 보였다. C 지역은 혼합

층의 깊이가 얇고, 최대수온구배는 크며, 수온약층의 두께는 얇게 나타남에 따라 A 지역과 반대되는 특성을 보였다. D 지역은 C 지역과 비슷한 경향을 보이나, 최대수온구배가 C 지역보다 작게 나타나는 특징을 보였다.

이렇게 지역별 수온 수직구조의 특성에 차이를 보이는 것은 각 지역의 수심 및 표층수온의 영향뿐 아니라, A 지역은 일본 연안류의 영향을, C 지역은 중국 양자강의 담수 영향을, D 지역은 대마난류수의 영향을 많이 받기 때문인 것으로 판단된다.

결론

본 연구에서는 해양에서 수온의 수직구조를 대표할 수 있는 파라미터인 혼합층의 깊이, 최대수온구배, 수온약층의 두께를 정량적으로 추출하여, 제주 남부해역의 수온 수직구조의 공간분포 특성을 파악하였다. 또한, 세 가지 주요 파라미터를 이용한 군집분석을 통해 제주 남부해역을 지역적으로 분류하고 각 지역별 수온 수직구조의 특성을 비교하였다. 본

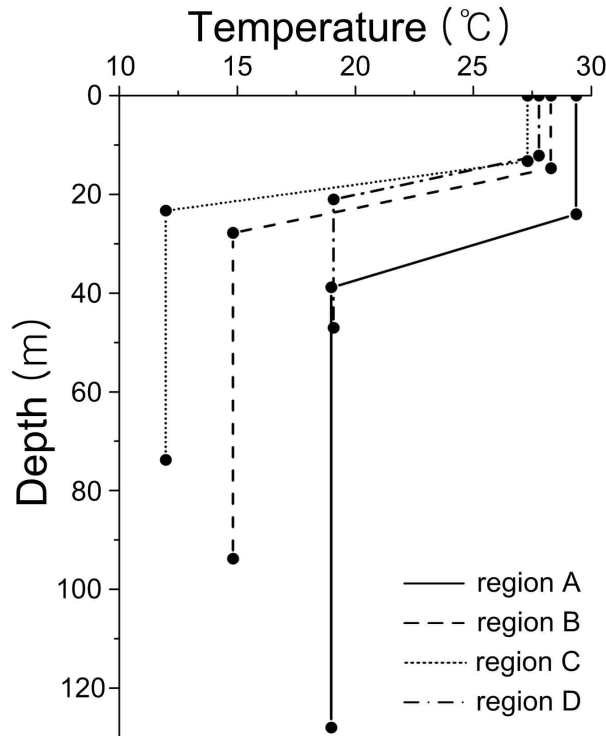


FIGURE 8. 하계(8월) 제주 남부해역 수온 수직구조의 지역별 특성

TABLE 5. 제주남부 해역의 군집 지역별 수온의 수직구조 파라미터의 표준화 점수(Z-score)의 평균

Parameter	Region			
	A	B	C	D
Mixed layer depth(m)	3.86	0.04	-0.54	-1.01
Maximum ΔT (°C/m)	-1.54	-0.17	1.93	-0.36
Thickness of thermocline(m)	1.26	0.33	-1.31	-1.92

연구의 주요 결론을 정리하면 다음과 같다.

첫째, 수온의 수직구조를 대표하는 세 가지 주요 파라미터를 정량적으로 추출하여, 각 파라미터 간의 상관관계뿐만 아니라 해양환경인자(표층수온, 수심)와의 상관관계도 분석할 수 있었다. 분석 결과 해양환경 인자에 따라 수온 수직구조의 형태가 다르게 나타남으로써 일반적인 해양 수온의 수직구조 특성을 정량적으로 확인하였다.

둘째, 하계 제주 남부해역의 수온 수직구조의 특성을 공간적으로 파악할 수 있었다. 특

히 혼합층의 깊이는 연구해역 전체에서 알게 나타나 전형적인 중위도 해역의 여름철 특성을 보였지만, 공간적으로는 제주도를 기준으로 서쪽보다 동쪽의 혼합층이 깊게 나타났다. 이는 제주 서쪽해역은 양자강과 황해저층냉수의 영향으로 대마난류의 세기가 약해져 제주 동쪽해역보다 표층수온이 낮기 때문으로 판단되며, 본 연구에서 제시한 표층수온 공간분포도가 이를 뒷받침하였다.

셋째, 수온 수직구조의 주요 파라미터에 대한 공간자기상관 지수를 산출할 수 있었다.

세 가지 파라미터 모두 제주 남부해역에서 군집패턴을 보였으며, 최대수온구배가 가장 강한 군집성을 보였다. 아울러 정량화된 수온의 수직구조 파라미터 값을 이용하여 공간자기상관 뿐 아니라, 지리가중회귀분석(GWR) 등의 다양한 GIS 공간분석이 가능할 것으로 사료된다.

넷째, 세 가지 주요 파라미터를 이용한 군집분석을 통해 제주 남부해역을 지역적으로 분류할 수 있었다. 단순한 표층 수온·염분의 평면적인 분류가 아니라, 3차원인 해양을 대표하는 수온 수직구조를 이용한 지역분류가 가능함을 제시하였다.

지금까지는 공간적으로 3차원의 특성을 지닌 해양에서 수직적인(수심에 따른) 분석을 수행하기에는 한계가 있어 왔다. 해양현상 그 자체를 파악하기 위해 각 수심층 마다의 속성 자료에 대한 수평적인 주제도를 제작하여 GIS 레이어로 관리하는데 그치고 있는 실정이었다. 하지만 이러한 접근으로는 수직적으로 변화하는 자료에 대한 시·공간적 변화 패턴을 분석하거나, 지역적인 특징을 정량적으로 구분하기에는 한계가 있다. 따라서 GIS의 공간분석 관점에서, 본 연구는 접근 및 분석이 어려운 해양의 수직적 데이터를 정량화하는 기법을 개발함으로써, 공간분석이 가능하도록 했다는데 큰 의미를 둘 수 있다.

본 연구에서 사용한 수온자료는 제주 남부해역에서 하계에 관측된 자료라는 한계성을 지니고 있어, 차 후 동해와 서해를 포함한 우리나라 전 해역을 대상으로 하는 보다 확장된 연구가 필요하다. 또한, 본 연구에서 제시한 해양 분류 방법은 차 후 물리적 특성을 고려한 해양 공간구획 시 도움이 될 것이며, 아울러 해양화학 및 해양생물의 수직적 분포 특성을 밝히는데 도움이 될 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 한국해양과학기술원 “기후변화가 남해권역 해양생태계에 미치는 영향 및 기능

평가기술 개발(PM57090)” 사업의 지원을 받아 수행되었음. 본 연구를 위해 논문을 검토해 주신 심사위원님께 감사드립니다. **KAGIS**

참고문헌

- 김현주. 2001. 해양심층수의 다목적 개발 및 다단계 이용. 어항 56:18-23.
- 나정열, 이성욱, 조규대. 1991. 한반도 근해의 해류 및 해수특성-한국 동해의 수온의 수직구조. Bull. Korean Fish. Soc 24(4):215-228.
- 윤동영, 최현우. 2012. 한국 남부해역의 수온 약층 추출 알고리즘 개발. Ocean and Polar Research 34(2):265-273.
- 최현우, 김계현, 이철용. 2007. 해양환경 공간분포 패턴 분석을 위한 공간자기상관 적용 연구. 한국지리정보학회지 10(4):60-74.
- 한국해양과학기술원. 1987. 한국 동해 남부해역에서의 해양순환의 역학적 과정에 대하여. 67쪽.
- 해양수산부. 2001. 해양심층수의 다목적 개발. 1:17-32.
- 국립수산과학원. 2012. 정선해양관측자료. <http://kodc.nfrdi.re.kr>. Accessed 9 Mar 2012.
- Chu, P.C. 1995. A feature model for Arctic upper ocean thermal structure. Proceedings of the 4th Conference on Polar Meteorology and Oceanography, American Meteorological Society, Boston, Massachusetts, pp.224-227.
- Chu, P.C., C.R. Fralick, S.D. Haeger and M.J. Carron. 1997. A parametric model for the Yellow Sea thermal variability. Journal of Geophysical Research 102(5):10499-10507.

- De Boyer Montegut C., G. Madec, A.S. Fischer, A. Lazar and D. Iudicone. 2004. Mixed layer depth over the global ocean: an examination of profile data and a profile-based climatology. *Journal of Geophysical Research* 109 (C12003):1–20.
- Fritsch, F.N. and R.E. Carlson. 1980. Monotone piecewise cubic interpolation. *SIAM Journal on Numerical Analysis* 17(2):238–246.
- Hastenrath, S. and J. Merle. 1987. Annual cycle of subsurface thermal structure in the tropical Atlantic Ocean. *Journal of Physical Oceanography* 17:1518–1538.
- Kara, A.B., P.A. Rochford and H.E. Hurlburt. 2000. An optimal definition for ocean mixed layer depth. *Journal of Geophysical Research* 105(C7):16803–16821.
- Lim, S., C.J. Jang, I.S. Oh and J. Park. 2012. Climatology of the mixed layer depth in the East/Japan Sea. *Journal of Marine Systems* 96–97:1–14.
- Knauss, J.A. 1978. *Introduction to Physical Oceanography*. Prentice Hall, USA, 338pp.
- Martin, P.J. 1985. Simulation of the mixed layer at OWS November and Papa with several models. *Journal of Geophysical Research* 90(c1):903–916.
- Moran, P.A.P. 1948. The interpretation of statistical maps. *Journal of the Royal Statistical Society Series B (methodological)* 10:243–251.
- Park, S. and P.C. Chu. 2007. Synoptic distributions of thermocline surface mixed layer and thermocline in the Southern Yellow and East China Seas. *Journal of Oceanography* 63:1021–1028.
- Prasad, T.G. and N. Bahulayan. 1996. Mixed layer depth and thermocline climatology of the Arabian Sea and western equatorial Indian Ocean. *Indian Journal of Marine Sciences* 25:189–794.
- Zang, Y., J.G. Bellingham, M. Godin, J.P. Ryan, R.S. McEwen, B. Kieft, B. Hobson and T. Hoover. 2010. Thermocline tracking based on peak-gradient detection by an autonomous underwater vehicle. *Proceeding MTES/IEEE Oceans' 10*, Seattle, pp.1–4. [KAGIS](#)