

Note

한국 남부해역의 수온약층 추출 알고리즘 개발

윤동영 · 최현우*

한국해양과학기술원 해양과학데이터센터
(425-600) 경기도 안산시 상록구 해안로 787

Development of Algorithms for Extracting Thermocline Parameters
in the South Sea of Korea

Dong-Young Yoon and Hyun-Woo Choi*

Oceanographic Data & Information Center, KIOST
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

Abstract : A new algorithm was developed, not only to detect the existence of a thermocline, but also to extract the thermocline parameters (such as thermocline thickness, mixed layer thickness, maximum temperature gradient, and temperature difference of thermocline), using the vertical profile of water temperature. According to Kappa analysis, in order to find adequate threshold values of vertical water temperature gradients ΔT ($^{\circ}\text{C}/\text{m}$), agreement and reliability were 87% and 0.74 respectively, in the conditions of maximum $\Delta T \geq 0.5$ and surface and bottom layers $\Delta T < |0.2|$. Also, three different kinds of methods, viz. 1. Gradient method, 2. Hyperbolic tangent method, and 3. Differential hyperbolic tangent method, were tested to extract the key parameters of a thermocline. Comparing the results of three different methods, the differential hyperbolic tangent method was the most appropriate to extract the start and end point of a thermocline curve.

Key words : thermocline detection, thermocline parameter extraction, differential hyperbolic tangent, Kappa statistic, South Sea of Korea

1. 서 론

해양의 수직적 수온 구조에서 혼합층(mixed layer) 아래 수온이 급격하게 변하는 지점을 수온약층(thermocline)이라 한다(Knauss 1978). 이러한 수온약층은 밀도약층(pycnocline) 및 염분약층(halocline)과 함께 수층을 성층화하는 요인으로 작용하며(Millero and Sohn 1992; Ross 1995), 해양순환(ocean circulation), 해양생태학(marine ecology), 수중음향학(underwater acoustics) 등 해양과 관련된 학문을 이해하는데 중요한 역할을 한다(Zhang et al.

2010).

수온약층을 탐지하고 추출하기 위한 노력은 수온약층의 윗점(thermocline top)과 혼합층의 아랫점(mixed layer base)이 동일함에 따라 혼합층의 아랫점을 찾기 위한 노력에서부터 시작되었으며, 혼합층의 탐지와 관련된 대부분의 연구에서 해수표면과의 수온차이가 기준 수온 차 이상이 나타나는 수심을 혼합층의 아랫점으로 정의하였다(Thompson 1976; Martin 1985; Kara et al. 2000; de Boyer Montgut et al. 2004; Lim et al. 2012).

혼합층의 아랫점을 정의한 결과를 바탕으로 Hastenrath and Merle (1987)는 대서양에서 관측된 수온자료를 사용하여 해수면과 1°C 차이가 시작되는 수심을 수온약층의

*Corresponding author. E-mail : hwchoi@kordi.re.kr

윗점, 수온구배 ΔT (temperature gradient of seawater)가 $0.04^\circ\text{C}/\text{m}$ 이하로 나타나는 수심을 수온약층의 아랫점 (thermocline base)으로 정의하여 수온약층을 추출하였다. Prasad and Bahulayan (1996)은 인도양의 서쪽과 아라비아 해를 대상으로 ΔT 가 $0.04^\circ\text{C}/\text{m}$ 이상 나타나는 조건만으로 수온약층을 추출한 바 있으며, Chu (1995)는 북극해를 대상으로 ΔT 의 수직구조를 이용한 수온약층 추출 모델을 제시하였고, 이를 이용하여 Chu et al. (1997)은 황해를 대상으로 혼합층의 두께 및 수온약층의 윗점과 아랫점의 온도차에 대한 공간분포특성을 파악하였다. 또한, Park and Chu (2007)는 동중국해를 대상으로 최대수심 200 m를 기준으로 얇은 부분은 수온 차(0.1°C) 조건을, 깊은 부분은 $\Delta T(0.025^\circ\text{C}/\text{m})$ 조건을 적용하여 수온약층을 추출한 다음 수온약층의 두께 및 수온약층의 윗점과 아랫점의 온도차에 대한 공간분포특성을 파악하였다.

이와 같이 기존연구에서는 기준 수온 또는 기준 수온구배를 임계값으로 설정하여 수온약층을 추출하였는데, 이는 다양한 형태의 수온 수직구조에 대해 하나의 기준치로 수온약층을 추출하는 오류를 지니게 된다. 이를 해결하기 위한 방법으로 수온구배의 수직구조를 이용하여 수온약층을 추출하는 모델을 제안(Chu 1995) 하였지만, 이 역시 수온약층을 탐지하기 위한 초기 조건을 정성적으로 판단해야 하는 단점을 지녔다.

따라서 본 연구에서는 혼합층, 수온약층, 심해층으로 성층화 되어 있는 전형적인 해양 수온의 수직구조에서 수온약층 형성 유무를 자동으로 탐지하는 기법을 개발하고, 이러한 수온약층의 주요 파라미터(수온약층의 두께, 혼합층의 두께, 수온약층의 최대 수온구배, 수온약층의 온도 차)를 추출할 수 있는 알고리즘을 개발하고자 한다.

2. 연구 절차

연구대상 지역 및 자료 선정

본 연구를 위한 해역은 제주도 남부해역($32^\circ\sim 33^\circ\text{N}$, $126^\circ\sim 128^\circ\text{E}$)으로 선정하였다(Fig. 1). 이 해역은 우리나라의 해양환경에 영향을 미치는 대마난류수가 흐르는 지역으로, 하계에 계절수온약층(seasonal thermocline)이 존재하여 이를 탐지하고 수온약층 파라미터를 추출하는데 적합한 지역으로 판단하였다.

연구에 사용한 자료는 17년간(1994~2010)의 정선해양관측 자료 중 하계(8월)의 표준 수층(표층, 10 m, 20 m, 30 m, 50 m, 75 m, 100 m, 125 m)에서 측정된 153개 수직 수온자료 셀을 사용하였다(국립수산과학원 2011).

연구 절차

표준 수심 층의 정선해양관측 수온자료를 수집하고,

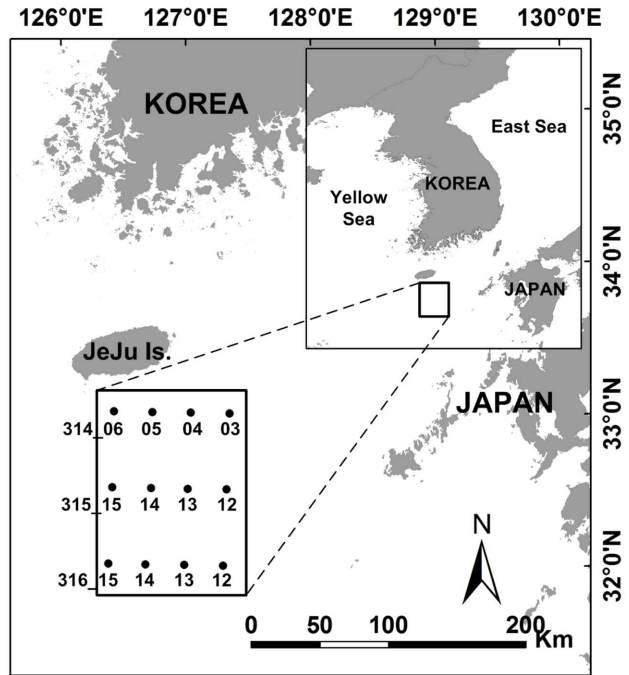


Fig. 1. Study area with temperature observed stations by National Fisheries Research & Development Institute

Monotone cubic interpolation(Fritsch and Carlson 1980) 방법으로 수직적인 보간을 통해 수심 1 m 간격의 수온자료를 추출한 후, 각 수온자료 셀 마다의 수온구배 값을 산출하였다. 수온약층의 형성 여부는 수온구배 임계값을 이용하여 판별하였으며, 육안판별 결과와의 일치도와 신뢰도를 분석하기 위해 Kappa 통계(Cohen 1960)를 수행하였다.

수온약층의 파라미터를 추출하기 위해서는 수온구배의 수직구조를 이용한 gradient method, 쌍곡탄젠트 함수의 개념을 수온의 수직구조에 도입한 hyperbolic tangent method, 미분된 쌍곡탄젠트 함수의 개념을 수온구배의 수직구조에 도입한 differential hyperbolic tangent method를 각각 적용하였다. 여기서 첫 번째 방법은 기존의 혼합층과 수온약층 연구에서 전통적으로 사용되던 방법이고, 두 번째 방법은 기존의 수평적 수온전선 탐지에 사용했던 개념을 수직적 수온약층 탐지에 적용한 방법이며, 세 번째 방법은 첫 번째와 두 번째 개념을 집목한 방법으로 수온약층을 추출하기 위해 본 연구에서 새롭게 개발한 방법이다.

이러한 세 가지 방법 가운데 수온약층을 가장 잘 추출하는 방법을 선택하여 수온약층 주요 파라미터인 수온약층의 두께(thickness of thermocline), 혼합층의 두께(thickness of mixed layer), 최대 수온구배(maximum ΔT) 그리고 수온약층의 윗점과 아랫점의 온도 차인 수온약층

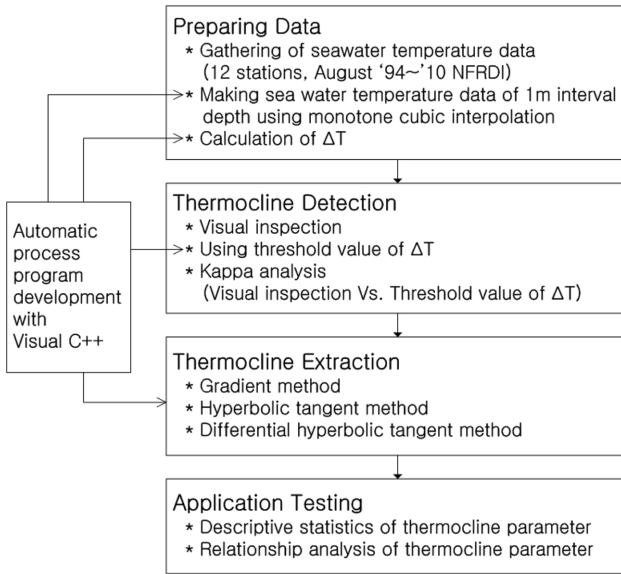


Fig. 2. The flowchart of developing a new algorithm

의 온도 차(temperature difference of thermocline)를 추출하였다.

또한, 수온약층 파라미터의 기술 통계량 및 파라미터들 간의 상관관계 분석을 통해 수온약층 파라미터의 정량적인 분석의 가능성도 시험적으로 살펴보았다.

표준 수심 층의 수온을 1 m 간격의 수온자료로 변환하는 작업과 수온약층의 파라미터를 추출하는 처리과정을 자동화하기 위해 Visual C++를 이용하여 프로그램을 개발하였다. 수온자료 수집에서부터 수온약층의 탐지와 수온약층의 파라미터를 추출 및 시험 분석에 이르는 제반 연구 절차는 Fig. 2와 같다.

3. 수온약층 탐지 알고리즘 개발

수온약층의 형성 유무를 탐지하기 위해서는 수온의 수직구조를 직접 그려 육안으로 판단하는 방법이 가장 좋은 방법이다. 하지만 대량의 수온수직 프로파일을 일일이 그 래프로 수온약층 유무를 확인하는 과정은 연구자의 주관성이 들어가 판별자마다 다를 수 있어 객관성이 결여되는 단점이 있다. 따라서 수온약층의 연구에 있어 선행적으로

수행해야 하는 수온약층의 형성에 대한 판단을 정량적인 기준에 의해 탐지하는 기법을 개발하고자 하였다.

수온자료 제작

정선해양관측 자료는 수심 층의 간격이 넓고 균등하지 않는 표준 수심 층을 대상으로 관측됨에 따라 수온약층을 탐지하고 파라미터를 추출하는데 어려움이 있어 1 m 간격의 균등한 수온자료가 필요하다. 따라서 표준 수심 층의 수온자료에 대한 보간(interpolation)이 필요하다. 보간법에는 선형보간(linear interpolation), 다항식보간(polynomial interpolation), 3차 스플라인 보간(spline interpolation), monotone cubic interpolation 등과 같은 다양한 보간법이 있다(이 2000; 지 등 2000; 용 등 2004). 이러한 방법들의 특성을 계산의 용이성, 연속이며 미분가능성, 구조의 비요동성, 진행 방향의 일정함 등 네 가지 특성을 기준으로 Table 1과 같이 정리하였다. 본 연구에서는 이러한 네 가지 보간 특성을 만족하며 표준 수심 층의 수온 값을 유지하면서 보간이 가능한 monotone cubic interpolation 기법을 사용하여 수심 층 1 m 간격의 수온자료를 산출하였다.

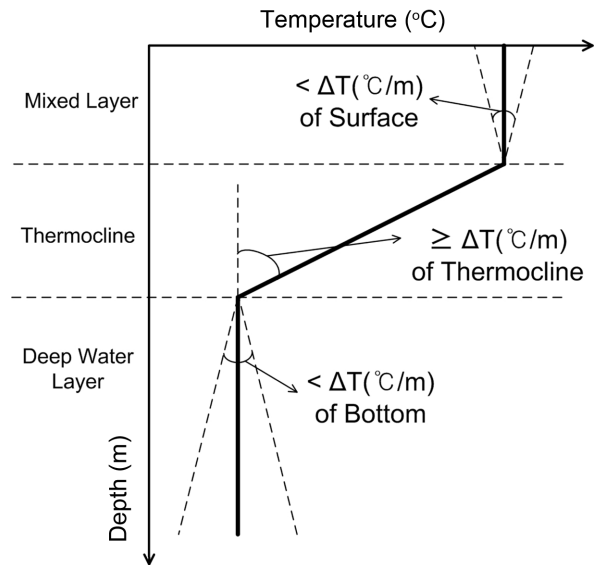


Fig. 3. Definition of the threshold value of vertical water temperature gradients ΔT ($^{\circ}\text{C}/\text{m}$) for the thermocline formation

Table 1. Comparisons of the characteristics of four different interpolation methods

Characteristics	Linear interpolation	Polynomial interpolation	Spline interpolation	Monotone cubic interpolation
Easy to calculate?	Yes	No	Yes	Yes
Continuous and differentiable?	No	Yes	Yes	Yes
Runge's phenomenon does not occurs?	Yes	No	No	Yes
Monotonicity is guaranteed?	Yes	No	No	Yes

수온약층 탐지 알고리즘 개발

수온약층이 형성되었는지의 판단은 수온의 수직적 구조가 세 가지 층(혼합층, 수온약층, 심해층)으로 구분가능하게 달렸다. 따라서 Fig. 3과 같이 혼합층과 심해층에서는 일정 수온구배 이하의 값을 가져야 하고, 수온약층에서는 일정 수온구배 이상의 값을 가져야하는 이론을 기초로 수온약층의 출현유무를 탐지하는 알고리즘을 개발하였다.

혼합층에서는 해수면의 수온구배, 수온약층에서는 최대 수온구배, 심해층에서는 최고수심에서의 수온구배를 수온약층 형성 조건으로 사용하였다. 해수면과 최고수심에서의 수온구배는 8가지 임계값(<0.05|~<0.4|°C/m)을 사용하였고, 최대수온구배 또한 8가지 임계값(≥0.1~≥0.8°C/m)을 사용하여, 두 임계값을 동시에 만족하는 경우를 수온약층이 존재하는 판단 기준으로 정하였다.

이러한 판단 방법의 신뢰성을 측정하기 위한 방법으로는 일치도(agreement) 통계와 Kappa 계수를 구하는 방법이 있다. Kappa 계수는 식 (1)과 같이 두 판단방법의 일치도가 과대 추정되는 문제점을 해결하기 위해 우연에 의한 확률을 제거한 값이다(Cohen 1960). 본 연구에서는 육안

으로 판별한 경우(정성적)와 수온구배의 임계값을 사용하여 판별되어진 경우(정량적)에 대한 일치도와 Kappa 계수를 구하여 신뢰도가 가장 높은 수온구배 임계값을 선정하였다. 일반적으로 Kappa 계수가 0.40에서 0.60이면 ‘두 판단 방법의 신뢰도가 있다’, 0.60에서 0.75이면 ‘두 판단 방법의 신뢰도가 높다’, 0.75 이상이면 ‘두 판단 방법의 신뢰도가 매우 높다’는 의미를 가진다(Fleiss 1981).

$$Kappa = \frac{P_A - P_C}{1 - P_C} \tag{1}$$

여기서 P_A 는 일치도 통계, P_C 는 확률적으로 우연에 의하여 일치될 확률을 의미한다.

수온약층 탐지 알고리즘 평가

수온약층의 출현유무를 수온의 수직적 구조를 세 가지 층으로 구분 가능한지를 기준으로 육안 판별한 경우와 수온구배 임계값을 사용하여 판별한 경우에 대한 일치도 및 Kappa 계수는 Table 2, 3과 같이 최대수온구배 임계값이 커짐에 따라 일치도와 신뢰도가 높아지는 경향을 보이다

Table 2. Agreement (%) of thermocline detections between the visual inspection and two kinds of threshold value of ΔT (°C/m)

		Maximum temperature gradient (°C/m) more than							
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
Surface and bottom temperature gradient (°C/m) less than	0.05	68.6	68.6	68.0	69.9	68.6	67.3	66.0	64.1
	0.10	72.5	73.2	74.5	76.5	77.8	72.5	69.3	66.7
	0.15	70.6	72.6	77.8	81.0	83.7	77.8	74.5	71.2
	0.20	69.3	72.5	79.7	83.0	86.9	81.7	77.8	74.5
	0.25	66.0	69.3	77.1	81.7	85.6	81.0	77.1	73.9
	0.30	62.7	66.0	75.8	81.0	85.0	80.4	76.5	73.2
	0.35	60.1	63.4	73.2	79.7	83.7	79.7	76.5	73.2
	0.40	58.8	62.1	71.9	78.4	83.0	79.1	76.5	73.2

Table 3. Kappa coefficients of thermocline detection between the visual inspection and two kinds of threshold values of ΔT (°C/m)

		Maximum temperature gradient (°C/m) more than							
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
Surface and bottom temperature gradient (°C/m) less than	0.05	0.39	0.39	0.38	0.42	0.40	0.38	0.36	0.32
	0.10	0.44	0.46	0.49	0.54	0.57	0.47	0.42	0.37
	0.15	0.38	0.42	0.54	0.62	0.68	0.57	0.51	0.45
	0.20	0.34	0.42	0.58	0.65	0.74	0.64	0.57	0.51
	0.25	0.26	0.34	0.52	0.63	0.71	0.63	0.53	0.50
	0.30	0.19	0.27	0.49	0.61	0.70	0.62	0.54	0.48
	0.35	0.13	0.21	0.43	0.58	0.67	0.60	0.54	0.48
	0.40	0.09	0.17	0.41	0.56	0.66	0.59	0.54	0.48

Table 4. Result of thermocline detection with the visual inspection and two kinds of threshold values of ΔT (maximum $\Delta T \geq 0.5^\circ\text{C}/\text{m}$, surface and bottom layers $\Delta T < |0.2|^\circ\text{C}/\text{m}$)

		Visual inspection		Total
		Yes	No	
Threshold value of ΔT	Yes	69	5	74
	No	15	64	79
Total		84	69	153

가 최대수온구배 $\geq 0.5^\circ\text{C}/\text{m}$ 를 기준으로 다시 낮아지는 경향을 보였다. 또한, 해수면과 최고수심에서도 수온구배 임계값이 커짐에 따라 일치도와 신뢰도가 높아지는 경향을 보이다가 수온구배 $< |0.2|^\circ\text{C}/\text{m}$ 를 기준으로 다시 낮아지는 경향을 보였다. 이 두 결과에 따르면, 최대수온구배가 $\geq 0.5^\circ\text{C}/\text{m}$ 이고, 해수면과 최고수심에서의 수온구배는 $< |0.2|^\circ\text{C}/\text{m}$ 일 경우 Kappa 계수가 0.74로 신뢰도가 가장 높게 나타나 이 두 조건이 수온약층 출현 유무를 탐지하는데 있어 가장 적합함을 보였다.

Table 2, 3의 결과를 종합하면, Table 4와 같이 153개 데이터 셀 중 육안판별로 수온약층이 형성된 경우와 미형성된 경우가 각각 84개, 69개이며, 수온구배 판별로 수온약층이 형성된 경우와 미형성된 경우가 각각 74개, 79개로 나타났다. 육안판별로는 수온약층이 형성된 것으로 판별하였으나, 수온구배 판별로는 미형성된 것으로 분석된 경우는 15개, 육안판별로는 미형성된 것으로 판별하였으나, 수온구배 판별로는 형성된 것으로 분석된 경우는 5개로 나타났다.

4. 수온약층 파라미터 추출 알고리즘 개발

수온약층을 구성하는 파라미터에는 수온약층 윗점의 수심과 수온, 수온약층 아랫점의 수심과 수온, 수온약층의 두께, 혼합층의 두께, 최대 수온구배, 최대 수온구배가 형성된 지점에서의 수심과 수온, 수온약층의 윗점과 아랫점의 온도차 등이 있다. 이러한 파라미터를 정량적으로 추출하기 위해서는 다양한 수온의 수직구조에서 정확한 수온약층의 윗점과 아랫점의 탐지가 중요하며, 이를 위해 본 연구에서는 gradient method, hyperbolic tangent method, differential hyperbolic tangent method 등 세 가지 방법의 실험을 통해 수온약층 파라미터를 추출하는 최적의 알고리즘을 개발하고자 하였다.

수온약층 파라미터 추출 알고리즘 개발

Gradient method를 사용하여 수온약층의 파라미터를 추

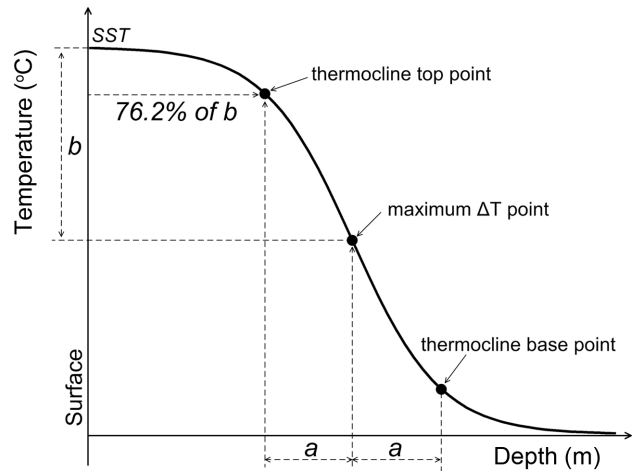


Fig. 4. The vertical water temperature curve using hyperbolic tangent function to understand the structure of thermocline (a denotes depth difference between depth at the point of maximum ΔT and depth of thermocline top point, b denotes temperature difference between temperature at the point of maximum ΔT and SST)

출하는 알고리즘은 수온구배의 수직구조에서 임의로 기준 수온구배를 설정하고, 기준 수온구배 이상이 나타나는 부분을 수온약층으로 정의하여 파라미터를 추출하는 알고리즘이다. 여기서 기준 수온구배가 처음 나타나는 지점이 수온약층의 윗점이 되며, 두 번째 나타나는 지점이 수온약층의 아랫점이 된다.

Hyperbolic tangent method를 사용한 알고리즘은, 위성 영상 SST(sea surface temperature) 자료에서 수온전선(thermal front)을 탐지하는데 사용되었던 방법으로 Shaw and Vennell (2000)에 의해 제안된 바 있으며, 본 연구에서는 쌍곡탄젠트 함수의 구조를 Fig. 4와 같이 수온의 수직 구조에 도입하였다. 개념적인 접근으로 식 (2)와 같이 x 성분은 수심, y 성분은 수온 값으로 쌍곡탄젠트 함수를 설계하였으며, 쌍곡탄젠트 함수 $1(\tanh 1 = 0.762)$ 에서 수온의 급격한 변화가 시작되는 부분을 가장 잘 반영하였다(Shaw and Vennell 2000). 이러한 이론에 근거하여 최대 수온구배가 나타나는 수심의 수온 값과 표층수온의 차이 값인 Fig. 4의 b를 계산하고, b의 76.2%가 되는 지점을 수온약층의 윗점으로 정의하였다. 또한, 최대수온구배가 나타나는 수심과 수온약층 윗점의 수심차이인 Fig. 4의 a를 계산하고, a의 2배(2a)가 되는 지점을 수온약층의 아랫점으로 정의하였다. 이와 같이 hyperbolic tangent method는 수온약층의 수직 구조가 쌍곡탄젠트 함수 그래프 구조와 같다는 가정 하에 수온약층의 파라미터를 추출하는 알고리즘이다.

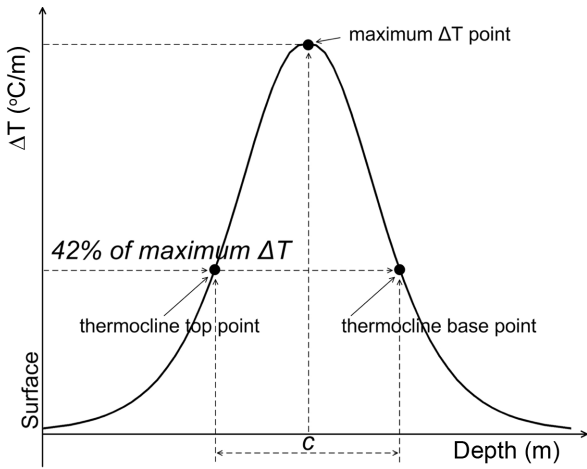


Fig. 5. Diagram illustrating a temperature gradient (ΔT) curve using differential hyperbolic tangent function (c denotes thickness of thermocline)

$$Temperature(x) = \tanh x = \frac{\sinh x}{\cosh x} = \frac{e^{2x} - 1}{e^{2x} + 1} \quad (2)$$

여기서 x 는 수심을 의미한다.

Differential hyperbolic tangent method를 사용한 알고리즘은 본 연구에서 새롭게 개발한 것으로, 식 (3)과 같이 미분된 쌍곡탄젠트 함수의 구조를 Fig. 5와 같이 수온구배의 수직구조에 도입한 방법이다. 개념적 접근으로 미분된 쌍곡탄젠트 함수의 x 성분은 수심, y 성분은 ΔT 를 의미하며, hyperbolic tangent method에서 쌍곡탄젠트 함수 1의 값이 수온의 급격한 변화가 시작되는 부분을 가장 잘 반영함에 따라, 쌍곡탄젠트 함수 1의 미분 값인 0.42를 수온약층 추출 기준으로 설정하였다. 이러한 이론을 수온구배의 수직구조에 도입하여 최대수온구배의 42%가 되는 지점을 수온약층의 윗점과 아랫점으로 정의하여 수온약층의 파라미터를 추출하는 알고리즘이다.

$$\begin{aligned} \Delta T(x) &= \frac{d}{dx} \tanh x = 1 - \tanh^2 x = \operatorname{sech}^2 x \\ &= \frac{1}{\cosh^2 x} = \frac{4}{e^{2x} + e^{-2x} + 2} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 x 는 수심을 의미한다.

이론적으로 수온의 수직구조가 쌍곡탄젠트 함수 그래프와 같이 수온약층이 대칭적 구조라면, hyperbolic tangent method를 사용한 알고리즘과 differential hyperbolic tangent method를 사용한 알고리즘으로 구한 수온약층의 윗점과 아랫점은 동일하게 된다.

수온약층 파라미터 추출 알고리즘 평가

수온약층을 탐지하는데 신뢰도가 가장 높은 수온구배

조건은 최대수온구배가 $0.5^\circ\text{C}/\text{m}$ 보다 크고, 해수면과 최고수심에서의 수온구배는 $0.2^\circ\text{C}/\text{m}$ 보다 작았다. 이러한 수온구배 조건을 이용한 경우와 육안으로 판별한 경우 모두 수온약층을 탐지해낸 69개의 수온 데이터 셀에 대해, 세 가지 방법의 수온약층 파라미터 추출 알고리즘을 적용하여 수온약층의 윗점과 아랫점을 추출하였다.

이 두 지점을 추출하는데 사용한 세 가지 알고리즘의 적용 결과를 평가하기 위해서는 수온약층의 구조를 결정하는 수온약층의 윗점과 아랫점이 실제로 어느 수심에서 위치하는지 알아야 한다. 따라서 본 연구에서는 이 두 지점을 수온이 급격히 변화하기 시작되는 수심(수온약층의 윗점)과 끝나는 수심(수온약층의 아랫점)으로 일차 육안으로 선정한 후, 육안 판단의 오차범위를 각각의 수심에서

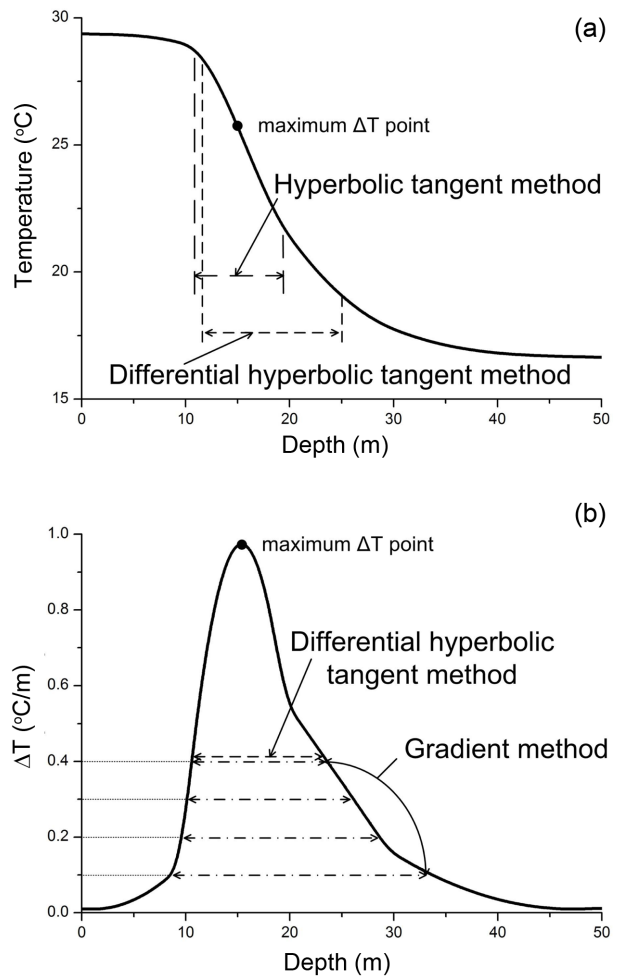


Fig. 6. Schematic diagrams of vertical water temperature curve (a) and temperature gradient (ΔT) curve (b) to show differences of the results of three different methods (gradient method, hyperbolic tangent method, and differential hyperbolic tangent method) using water temperature data set observed in August 2001 at the 316_13 station in Fig. 1

± 3 m로 정의하여 세 가지 방법의 정확도를 각각 계산하였다.

Fig. 6은 수온약층의 파라미터를 추출하는 세 가지 방법의 차이를 설명하기 위해 Fig. 1의 316_13 정점에서 2001년 8월에 관측한 실제 수온자료를 사용하여 제작한 수온의 수직 곡선 구조도이다. Fig. 6의 (a)는 수온곡선, Fig. 6의 (b)는 수온구배곡선을 의미한다.

Gradient method를 사용하여 수온약층의 윗점과 아랫점을 추출한 결과 Table 5와 같이 수온구배 임계값이 $0.3^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 이상인 경우 수온약층의 추출 정확도가 75%로 가장 높게 나타났으며, 수온구배 임계값이 $0.1^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 이상인 경우 9%로 가장 낮게 나타났다. 이는 Fig. 6의 (b)와 같이 수온구배 조건에 따라 추출된 수온약층의 수심 구간 차이가 크기 때문에 수온약층의 추출 정확도가 각각 다르게 나타난 것이다. 다양한 형태의 수온약층 구조를 유동적인 기준이 아닌 하나의 임계값을 기준으로 추출하게 되는 gradient method의 단점을 보여준다.

Hyperbolic tangent method를 사용하여 수온약층의 윗점과 아랫점을 추출한 결과 Table 5와 같이 69개의 자료 셀 중 40개 자료만이 수온약층을 제대로 추출하여 58%의 정확도를 보였다. 정확도가 낮게 나타난 원인은 Fig. 6의 (a)와 같이 최대수온구배 지점을 기준으로 수온약층 윗점과 아랫점이 비대칭일 경우(69개 전체 자료 중 54%) 수온약층을 제대로 추출하지 못하기 때문이며, 이는 hyperbolic

Table 5. Comparison of three algorithms' accuracy with the visual inspection

Algorithm	Target	Condition	Success	Accuracy (%)
Gradient method	ΔT	≥ 0.1	6	9
		≥ 0.2	32	46
		≥ 0.3	52	75
		≥ 0.4	47	68
Hyperbolic tangent method	Temperature	76.2%	40	58
Differential hyperbolic tangent method	Maximum ΔT	$\geq 42\%$	69	100

Table 6. Descriptive statistics of four thermocline parameters

Parameter	Min.	Max.	Mean	S.D.
Thickness of mixed layer (m)	9	33	16.2	5.8
Thickness of thermocline (m)	7	31	13.8	5.0
Temperature difference of thermocline ($^{\circ}\text{C}$)	4.23	14.49	8.73	2.14
Maximum temperature gradient: ΔT ($^{\circ}\text{C}/\text{m}$)	0.51	1.62	0.89	0.26

Total number of data is 69

tangent method의 단점으로 나타났다.

Differential hyperbolic tangent method를 사용하여 수온약층의 윗점과 아랫점을 추출한 결과 Table 5와 같이 69개의 자료 셀 모두 수온약층을 추출하여 100%의 정확도를 보였다. 이 방법은 수온약층의 구조에 따라 수온약층 파라미터를 추출하는 기준을 유동적으로 적용하고, 수온구배의 분포가 비대칭인 경우에도 Fig. 6의 (a), (b)와 같이 수온약층 구간을 정확히 추출하는 장점을 보였다.

5. 시험 적용

수온약층을 가장 잘 추출하는 알고리즘인 differential hyperbolic tangent method를 적용하여 추출되어진 수온약층 구조에서 4가지 주요 수온약층 파라미터(수온약층의 두께, 혼합층의 두께, 최대 수온구배, 수온약층의 윗점과 아랫점의 온도 차)에 대한 기술 통계량을 도출하고 파라미터들 간의 상관성을 분석하였다.

Table 6과 같은 파라미터들의 기술통계량에 의하면, 하계 제주남부해역의 수온약층과 혼합층의 평균 두께는 각각 13.8 m와 16.2 m이며, 수온약층의 최대 수온구배는 평균 $0.89^{\circ}\text{C}/\text{m}$, 수온약층 윗점과 아랫점의 온도차이인 수온약층의 평균 수온 차는 8.73°C 로 나타났다.

이러한 4가지 파라미터에 대한 상호 상관성 분석 결과는 Table 7과 같다. 혼합층의 두께와 최대수온구배는 음의 상관관계를 보여, 혼합층이 깊어지면 최대수온구배는 작아짐을 알 수 있다. 수온약층의 두께와 수온약층 윗점과 아랫점의 온도차는 양의 상관관계, 수온약층의 두께와 최대수온구배는 음의 상관관계를 보여, 수온약층의 두께가 두꺼워지면 수온약층의 윗점과 아랫점의 온도차가 커지며, 최대수온구배는 작아진다. 또한, 최대수온구배와 수온약층 윗점과 아랫점의 온도차는 양의 상관관계를 보여, 최대수온구배가 커지면 수온약층의 윗점과 아랫점의 온도차는 커지게 된다.

이와 같이 수온약층 파라미터를 정량적으로 추출함으로써 연구해역의 수온약층 구조를 정량적으로 이해하는데 유용할 뿐 아니라, 수온약층 구조 특성에 따른 파라미터들 간의 관계도 정량적으로 분석할 수 있게 된다.

Table 7. Pearson's correlation coefficients between thermocline parameters

	B	C	D
Thickness of mixed layer (A)	0.129	-0.284**	-0.325***
Thickness of thermocline (B)		0.457***	-0.651***
Temperature difference of thermocline (C)			0.323***
Maximum temperature gradient (D)			

p-value (***<0.01, **<0.05, *<0.1), total number of data is 69

6. 요약 및 토의

하계 한국 남부해역을 대상으로 수온약층의 형성 여부를 정량적인 기준으로 판단하는 수온약층 탐지 기법과 다양한 수온의 수직구조를 반영한 수온약층 추출 알고리즘을 개발하였다. 수온약층 출현 여부는 수온구배 임계값을 이용하여 판별한 결과 높은 신뢰도를 보였고, 수온약층 파라미터는 differential hyperbolic tangent method를 사용하여 추출한 결과의 정확도가 높게 나타났다. 또한, 추출된 수온약층 파라미터의 기술통계량 및 파라미터간의 상관관계도 시험 분석함으로써 수온약층 추출 알고리즘의 유용성도 제시하였다.

본 연구에서 표준 수심 층을 대상으로 관측된 수온자료를 monotone cubic interpolation 기법을 사용하여 수심 1 m 간격의 수온자료로 변환하였다. 그 결과 수온구배가 표준 수심 층에서 급변하는 층계가 형성되는 현상이 나타남에 따라 수온약층 구조가 비대칭일 경우 수온약층 파라미터를 추출하는데 악영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서 차후 CTD로 관측한 수직적으로 연결된 1 m 간격의 수온자료로 수온약층 구조를 정밀하게 탐지하고 분석하여, 본 연구에서 제시한 수온약층 탐지 및 파라미터 추출 알고리즘을 정밀 검증할 필요가 있다.

또한, 본 연구에 사용한 수온자료는 제주 남부해역에서 하계에 관측된 자료라는 한계성을 지니고 있다. 따라서 다른 해역과 계절을 대상으로 본 연구를 통해 개발한 알고리즘을 적용하여 알고리즘의 신뢰도 및 정확성을 검증하는 것이 필요하다.

본 연구에서 제시한 수온약층 탐지 및 추출 알고리즘은 수온약층 형성여부를 자동으로 판별하여 수온약층 파라미터를 정량적으로 추출해 낼 수 있기 때문에 해양생물, 해양환경 등의 다양한 인자와의 관계 분석이 가능하다는 장점을 지닌다. 또한, 연구 해역의 장기적인 수온약층 파라미터 추출을 통해 시계열적인 수온의 수직구조 변동 패턴 분석도 가능할 것으로 기대한다.

사 사

본 연구는 2011년도 한국해양연구원의 기후변화가 남

해권역 해양생태계에 미치는 영향 및 기능 평가 기술 개발(PM56600) 사업의 지원을 받아 수행되었으며, 본 논문을 상세히 검토해 주신 심사위원님께 감사사를 드립니다.

참고문헌

- 국립수산과학원 (2011) 정선해양관측자료. <http://kocd.nfrdi.re.kr> Accessed 9 Mar 2011
- 용호택 (2004) MATLAB을 이용한 수치해석. 두양사, 서울, 476 p
- 이관수 (2000) 공학도를 위한 수치해석. 원화, 서울, 722 p
- 지영준, 김화준, 허정권 (2000) C로 구현한 수치해석. 높이깊이, 서울, 500 p
- Chu PC (1995) A feature model for Arctic upper ocean thermal structure. In: Proceedings of the fourth conference on polar meteorology and oceanography, American meteorological society, Boston, Massachusetts, pp 224-227
- Chu PC, Fralick CR, Haeger SD, Carron MJ (1997) A parametric model for the Yellow Sea thermal variability. *J Geophys Res* **102**(5):10499-10507
- Cohen J (1960) A coefficient of agreement for nominal scales. *Educ Psychol Meas* **1**:36-47
- de Boyer Montégut C, Madec G, Fischer AS, Lazar A, Iudicone D (2004) Mixed layer depth over the global ocean: an examination of profile data and a profile-based climatology. *J Geophys Res* **109**(C12003):1-20
- Fleiss JL (1981) Statistical methods for rates and proportions. Wiley, 321 p
- Fritsch FN, Carlson RE (1980) Monotone piecewise cubic interpolation. *Siam J Numer Anal* **17**(2):238-246
- Hastenrath S, Merle J (1987) Annual cycle of subsurface thermal structure in the tropical Atlantic Ocean. *J Phys Oceanogr* **17**:1518-1538
- Kara AB, Rochford PA, Hurlburt HE (2000) An optimal definition for ocean mixed layer depth. *J Geophys Res* **105**(C7):16803-16821
- Lim S, Jang CJ, Oh IS, Park J (2012) Climatology of the mixed layer depth in the East/Japan Sea. *J Marine Syst* **96-97**:1-14

-
- Knauss JA (1978) Introduction to physical oceanography. Prentice Hall, Saddle River, 338 p
- Martin PJ (1985) Simulation of the mixed layer at OWS November and Papa with several models. *J Geophys Res* **90**(C1):903-916
- Millero FJ, Sohn ML (1992) Chemical Oceanography. CRC Press, London, 414 p
- Park S, Chu PC (2007) Synoptic distributions of thermocline surface mixed layer and thermocline in the Southern Yellow and East China Seas. *J Oceanogr* **63**:1021-1028
- Prasad TG, Bahulayan N (1996) Mixed layer depth and thermocline climatology of the Arabian Sea and western equatorial Indian Ocean. *Indian J Mar Sci* **25**:189-794
- Ross DA (1995) Introduction to oceanography. Harper Collins, New York, 496 p
- Shaw AGP, Vennell R (2000) A front-following algorithm for AVHRR SST image. *Remote Sens Environ* **27**:317-327
- Thompson RORY (1976) Climatological numerical models of the surface mixed layer of the ocean. *J Phys Oceanogr* **6**(4):496-503
- Zang Y, Bellingham JG, Godin M, Ryan JP, Mcewen RS, Kieft B, Hobson B, Hoover T (2010) Thermocline tracking based on peak-gradient detection by an autonomous underwater vehicle. In: Proceedings of MTS/IEEE Oceans '10, Sydney, 24-27 May, pp 1-4
-

Received Apr. 19, 2012

Revised Jun. 15, 2012

Accepted Jun. 18, 2012