

해양의 수온전선 정량화를 위한 선밀도 지수 개발

최현우^{1*} · 김계현²

Development of Line Density Index for the Quantification of Oceanic Thermal Fronts

Hyun-Woo CHOI^{1*} · Kye-Hyun KIM²

요 약

해양에서 수온의 등온선 밀집 정도를 표준지수로 정량화하기 위해 선밀도 지수(line density index: LDI)를 개발하였다. 지수 값의 범위를 0에서 100까지 제한시킨 LDI의 개발과정에 대한 이론적 배경을 기술하였고, line의 총 길이가 해당 면적의 1/10를 넘지 못한다는 적용조건에 대한 타당성 검증도 수행하였다. LDI의 적용 실험을 위해 남해역에서 관측된 NOAA SST 자료를 이용하였다. GIS를 이용하여 SST 레스터 데이터로부터 0.1°C 등온선 벡터 데이터를 선형화하고 단위격자 영역을 폴리곤으로 제작한 후 공간중첩을 통해 LDI를 계산하였다. 단위 영역의 크기가 LDI의 분포에 미치는 영향을 분석하기 위해 두 종류의 격자 크기를 설계하여 LDI의 통계량을 산출하고 정규성 검정을 수행하였다. 분석 결과 격자크기에 따라 LDI의 평균과 정규성 같은 고유특성은 변하지 않으나, 통계량 값의 범위, 분산, 표준편차 등은 변하였는데, 이는 수온전선 구조가 복잡하고 전선폭이 격자 영역보다 훨씬 작을 때 발생하는 문제임이 확인되었다. 또한, LDI와 수온 차($\Delta T^{\circ}\text{C}$)와의 관계성을 분석하고 수온전선역의 수온 수평경도($\Delta T^{\circ}\text{C}/\text{km}$)를 선형회귀모델로부터 계산하여 기존 연구자들의 제시한 수온전선역에서의 수온 수평경도 값과도 비교하였다. 본 연구를 통해 새롭게 개발된 LDI가 지니는 의미는 해양환경에서 시·공간적인 변화에 따른 수온전선 형성 지역을 절대적인 지수치로 비교 가능함을 물론, 수온전선과 해양환경 또는 해양생물과의 관계를 정량적으로 분석할 수 있는 기반을 제시했다는 점이다.

주요어: 선밀도 지수 개발, 수온전선의 정량화, 지리정보시스템, 원격탐사

Abstract

Line density index(LDI) was developed to quantify a densely isothermal line rate as standard index in the ocean environment. Theoretical background on the LDI development process restricting index range 0 to 100 was described. And validation test was done for the LDI application condition that total line length is not greater than 1/10 of unit area. NOAA SST(Sea Surface Temperature) data were used

2006년 5월 12일 접수 Received on May 12, 2006 / 2006년 6월 28일 심사완료 Accepted on June 28, 2006
1 한국해양연구원 데이터운영팀 Data Management Section, Korea Ocean Research & Development Institute
2 인하대학교 지리정보공학과 Department of Geoinformatic Engineering, Inha University
* 연락처자 E-mail: hwchoi@kordi.re.kr

for the experimental application of LDI in the South Sea of Korea. Using GIS, 0.1°C isothermal lines were linearized as vector data from SST raster data, and unit area were built as polygon data. For the LDI calculation, spatial overlapping(line in polygon) was implemented. To analyze the effect of unit area size for the LDI distribution, two cases of unit area size were designed and descriptive statistics was calculated including performing normality test. The results showed no change of LDI's essential characteristics such as mean and normality except for the range of value, variance and standard deviation. Accordingly, it was found that complex structure of thermal front and even smaller scale of front width than unit area size could influence on the LDI distribution. Also, correlation analysis performed between LDI and difference of temperature($\Delta T^{\circ}\text{C}$), and horizontal thermal gradient($\Delta T^{\circ}\text{C}/\text{km}$) on the front was obtained from linear regression model. This obtained value was compared with the results from previous researches. Newly developed LDI can be used to compare the thermal front regions changing spatio-temporally in the ocean environment using absolute index value. It is considered to be significant to analyze the relationship between thermal front and marine environment or front and marine organisms in a quantitative approach described in this study.

KEYWORDS: *Line Density Index, Oceanic Thermal Front, Quantification, GIS, Remote Sensing*

서론

해양 전선(oceanic front)은 해양의 물리·화학·생물학적으로 서로 다른 특성을 가진 두 개의 수괴(water mass)가 접하는 지역으로 직·간접적으로 그 해역의 생태계 구조에 영향을 미치며, 이에 따라 먹이망 구조 및 생물 생산량이 다른 해역과는 다른 양상을 가진다. 또한 전선의 양측 면에서는 유속, 수온, 수질 등이 급격하게 변한다(Sverdrup 등, 1952). 따라서 전선해역의 생물·화학적 특성과 영양역학 구조를 밝히는 것은 해역의 전반적인 특성을 이해하는데 중요한 기초자료라고 할 수 있다.

이와 같은 해양 전선 중 수온의 수평경도가 급한 해역을 수온전선이라 하며, 등온선의 분포가 조밀한 곳을 말하는 상대적 개념으로 사용되어왔다. 그 동안 수온전선역을 정량적으로 결정할 때, 수온의 수평경도($\Delta T^{\circ}\text{C}/\text{km}$)를 사용하여 왔다. 양영진 등(1998)은 우리나라의 남해, 서해, 대한해협과 같은 등온선의 분포가 비교적 조밀한 수온의 수평경도가 $0.116^{\circ}\text{C}/\text{km}$

인 지역을 연안형으로, 동중국해와 같은 등온선의 분포가 비교적 완만한 수온의 수평경도가 $0.066^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 인 지역을 외해형으로 구분하기도 하였다. 또한, Uda(1959)는 수온의 수평경도가 $0.031\sim 0.310^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 이상인 지역을, Gong과 Son(1982), Park과 Choi(1995)는 $0.062^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 이상인 지역을, 나정열 등(1990)은 남해의 해수면에 형성된 수온전선의 수평수온 변화율에 대해 2월(1983, 1985, 1988)에는 $0.034\sim 0.1513^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 라고 했으며, 4월(1984, 1986, 1988)에는 $0.046\sim 0.120^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 라고 했으며, Ullman과 Cornillon(1999)은 평균 $0.210^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 인 지역을, Schick 등(2004)은 $0.375^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 이상인 지역을 수온전선역이라 제시하였다. 이와 같이 연구대상 시간과 공간에 따라 연구자의 주관적인 판단에 따라 수온전선역으로 정의된 수온의 수평경도 값에 차이가 있었으며, 그 범위는 대략 $0.031^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 에서 $0.375^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 까지 다양하였다. NOAA 위성영상으로부터 우리나라 주변 해역의 수온전선 지역을 추출하고 매핑하기 위한 방법으로 한상복과 서영상(1992)은

SST 영상의 cell당 온도차가 0.5°C 이상인 지역을 기각처리하여 흑색으로 매핑 하였으며, Kang 등(2001)은 3×3 pixel의 수온자료에 대해 최소자승 추정법을, Yoon 등(2005)은 sobel edge detection 방법을 사용하여 수온의 수평 경도를 추출한 바 있다.

선밀도는 해당지역에 선의 밀집 정도를 나타낼 수 있는 방법이며, 선밀도를 사용한 응용연구로써 단위 영역 당 도로의 길이를 나타낸 도로밀도(road density)를 계산하여 인간 활동이 생태계에 미치는 영향 등을 연구하였다. Mech(1989)는 늑대 군집의 생존율과 도로와의 연관성을 연구하기 위해 늑대 서식지에서의 도로밀도(km/km²)를 이용하였으며, Forman과 Alexander(1998)은 도로밀도가 동물의 이동, 생물군집의 분할, 수리학, 수서생태학 및 산불 패턴에 뚜렷한 영향을 미치는 유용한 지수라 제시하였다. 해양에 적용된 사례로는 Schick 등(2004)이 미국 메인만(Gulf of Maine)의 참다랑어(bluefin tuna) 분포와 수온전선과의 관계를 밝히기 위해 Kernel 방법에 의한 등온선 밀도를 계산하여 매핑 하였고, 등온선 밀도를 전선밀도(frontal density)라고 표현하기도 하였다.

이와 같이 해양에서 수온전선역을 나타낼 때 수온의 수평경도가 높고 낮음으로 구분할 수 있으나, 그 높고 낮음을 측정할 때, 연구 대상 해역과 관측시기에 따라 차이가 있는 상대적인 개념으로 접근할 수밖에 없었다. 등온선을 GIS 라인 데이터로 처리하여 단위면적당 라인의 총 길이를 계산하는 선밀도 개념으로 수온전선대를 보다 정량화하려는 시도(Schick 등, 2004)가 있었지만, 시·공간적인 변화에 따른 수온전선대를 절대지표의 개념으로는 제시할 수 없었다. 따라서 본 연구에서는 수온 수평경도의 강약 정도를 수치화하여 수온전선역을 정량화함은 물론, 표준화된 지수로 수온전선역을 나타내고자 선밀도 지수(line density index)를 개발하였다. 개발된 지수의 타당성 검증을 위해 이상 상태(ideal case)의 해양 조건에서 실험분석을 하였으며, 수온전선이 빈번하게 생

성되는 우리나라 남해를 대상으로 선밀도 지수의 적용실험을 수행하였다.

연구 방법

선밀도는 해당지역 내 선의 밀집 정도를 나타내는 방법이며, 선밀도를 계산하는 방법으로는 선의 수나 길이의 합을 단위지역의 면적으로 나누는 단순 계산방법과, 단위지역의 중심에 가까울수록 비중을 더 해주는 거리에 따른 가중치 계산방법이 있다(McCoy와 Johnston, 2002). 본 연구에서는 총 선의 길이를 단위지역의 면적으로 나누는 단순 선밀도 계산방법을 기본 원리로 사용하여, 해양환경에서 시·공간적인 변화에 따른 수온전선역의 상대적인 비교가 가능하도록 새로운 선밀도 계산식인 선밀도 지수를 개발하였다.

개발된 선밀도 지수의 타당성 검증을 위해, 선밀도 지수의 제약조건들에 대한 검증 실험을 하였으며, 수온전선을 단위지역(cell)당 수온차로 제시할 때와 선밀도 지수로 제시할 때와의 특성차이를 비교·검토하였다.

수온전선의 정량적인 추출을 위한 선밀도 지수의 적용실험은 2005년 3월 1일 우리나라 남해역을 촬영한 NOAA AVHRR 위성의 SST 자료를 사용하여 수행하였다. ESRITM의 ArcGIS를 사용하여 SST point 자료로부터 크리깅 보간법을 사용하여 레스터 데이터를 제작하고, 레스터 데이터로부터 0.1°C 등온선 벡터 데이터를 추출하였다. 격자 크기에 따른 차이를 검토하기 위해 남해역을 10×10 km와 5×5 km 격자 폴리곤으로 만들었으며, 각각의 폴리곤과 등온선 데이터를 중첩 처리하여(line in polygon) 단위격자 당 선밀도 지수값을 계산하였다. 또한, 단위격자내의 수온 차($\Delta T^{\circ}\text{C}$)와 선밀도 지수에 대한 선형회귀분석을 통해 수온전선역의 선밀도 지수 값에 해당하는 $\Delta T^{\circ}\text{C}$ 를 추출하여, 수온전선역에서 수온의 수평경도($\Delta T^{\circ}\text{C}/\text{km}$)를 제시한 기존의 연구결과들과도 비교하였다.

결과 및 고찰

1. 선밀도 지수(Line Density Index) 개발

지수(index)란 일반적으로 주어진 시점에서 변량의 기준치를 100으로 하여 비교시점의 변량의 크기를 퍼센트로 표시한 것을 말한다(김경중, 1989). 수온전선의 정량화를 위한 선밀도 지수는 엄밀히 말하자면 수온의 수평경도 지수라 할 수 있으며, 본 연구에서 개발된 선밀도 지수에 대한 기준치는 최대치를 100으로 설정하여, 수온전선의 값을 나타내고자 하였다. 개발된 선밀도 지수에 대한 이론적 정의 및 개발 과정과 이 지수를 수온전선 지수로 사용할 수 있는 조건들을 제시하였다.

먼저, 선밀도 지수의 이론을 개발하기 위한 기본배경은 선밀도 계산방법 중, 선의 총 길이를 단위지역의 면적으로 나누는 단순 선밀도 계산방법을 이용하였다. 이 방법에 의한 선밀도 값의 이론상 가능 범위는 0에서부터 ∞까지 이므로 등온선 분포 및 수온전선 지역을 정량화하여 표준지표로 사용하기 어렵게 된다. 따라서 등온선의 선밀도(line density: LD) 값의 범위를 0에서 100까지 제한시킬 필요가 있어, 다음과 같은 선밀도 지수(line density index: LDI) 산출식을 개발하였다.

$$LDI = \frac{1}{|\log(LD)|} \times 100$$

여기서,

$$LD = \frac{\text{Total line length}(m)}{\text{Area}(m^2)} \quad \text{이다.}$$

단위 영역에 포함된 총 선의 길이는 영역이 클수록 선의 길이도 커지게 된다. 따라서 단위 영역 내 선 길이의 비 즉, 선밀도(LD)와 관계시켜 선밀도 지수(LDI)식의 특성을 살펴보면 그림 1과 같다.

LD에 상용로그를 취한 값은 $-\infty$ 에서부터 $+$

∞ 까지 증가하는데, LD가 1일 때 0이 된다. 이 값의 역수를 취한 $1/\log(LD)$ 는 LD가 1이 될 때까지 0에서부터 $-\infty$ 까지 감소하며, LD가 1을 넘어서부터는 다시 $+\infty$ 에서부터 0으로 수렴하며 감소하게 된다. $1/\log(LD)$ 에 절대치를 취한 후 100을 곱한 $(1/|\log(LD)|) \times 100$ 즉, LDI는 LD가 1이 될 때까지 증가하다가 LD가 1일 때 무한대가 되며, 이후 LD가 1을 넘어서서는 LD가 증가함에 따라 LDI는 0으로 수렴하며 감소하게 된다. 여기서, LD가 0.1 즉, 총 line의 길이가 해당 영역 면적의 1/10이 될 때 LDI는 100이 된다. 따라서 LD가 0에서 0.1까지의 변함에 따른 LDI와의 관계를 자세히 나타내면 그림 2와 같다. LD가 0.01일 때 LDI가 50이 되며 두 변수는 로그함수 관계에 있음을 알 수 있다.

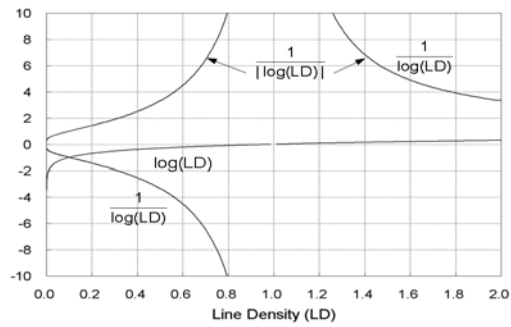


FIGURE 1. Characteristics of $\log(LD)$, $1/\log(LD)$ and absolute value of $1/\log(LD)$

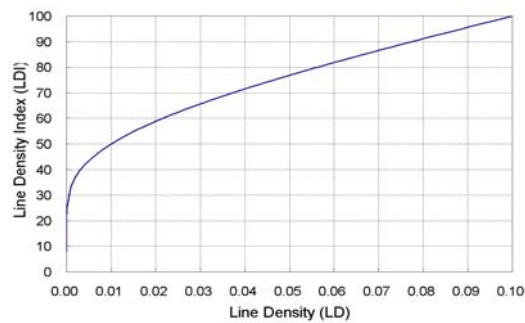


FIGURE 2. Permissible range of LD for the use of LDI

이러한 LDI를 수온전선 지수로 사용하기 위한 제약사항인 사용조건은 다음과 같다.

- line과 면적의 사용 scale : meter
- 등온선 간격($\Delta T^{\circ}\text{C}$) 기준 : 0.1°C
- $10^{-\infty} < \text{LD} \leq 0.1$
- $0 < \text{LDI} \leq 100$

LD와 비교하여 LDI의 특성을 알아보기 위해 실험적인 단위영역의 면적을 $1\text{ km}^2(10^6\text{ m}^2)$ 라 정하고, 단위영역 내 총 선 길이의 변화에 따른 LD와 LDI의 값을 나타내면 표 1과 같다. 표에서와 같이 LD의 범위는 $10^{-\infty} \sim 0.1$ 이며, LDI 범위는 $0 \sim 100$ 임을 알 수 있다.

LDI를 적용하기 위한 등온선 간격의 기준을 0.1°C 로 설정한 경우와 비교하여 0.2°C , 0.3°C 로 사용할 경우, 단위영역 내 선의 길이가 1/2, 1/3로 감소함에 따라 그림 3과 같이 LDI 값의 최대치는 100이 되지 않고 각각 76.9와 67.7이 된다. 따라서 LDI 적용 시 임의적인 등온선 값을 사용하면 임의적인 LDI값이 산출되므로, 표준지표로써의 LDI가 되기 위해서는 0.1°C 를 일관성 있는 등온선 값으로 사용하여야 한다.

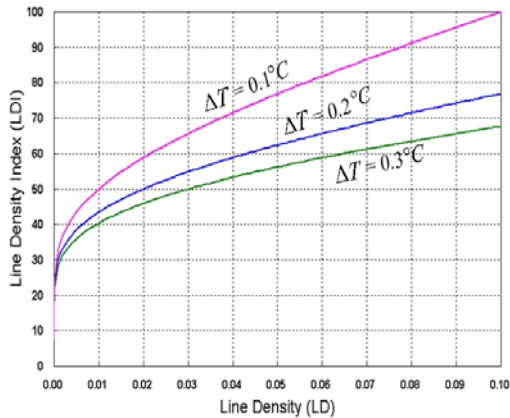


FIGURE 3. Comparison of LDIs with the change of isothermal line values

TABLE 1. Comparison of LD and LDI with the change of total line length within arbitrary unit area (10^6 m^2)

Total line length (m)	Line Density (LD)	Line Density Index (LDI)
$1*10^{-\infty}$	$1*10^{-\infty}$	~ 0
...
$1*10^{-8}$	$1*10^{-14}$	7.14
$1*10^{-5}$	$1*10^{-11}$	9.09
$1*10^{-2}$	$1*10^{-8}$	12.50
$1*10^1$	$1*10^{-5}$	20.00
$1*10^3$	$1*10^{-3}$	33.33
$2*10^3$	$2*10^{-3}$	37.05
$3*10^3$	$3*10^{-3}$	39.64
...
$9*10^3$	$9*10^{-3}$	48.88
$1*10^4$	0.01	50.00
$2*10^4$	0.02	58.86
$3*10^4$	0.03	65.67
...
10^5	0.1	100.00

2. 선밀도 지수의 타당성 검증

해양에서의 수온 범위는 대략 $-2 \sim 30^{\circ}\text{C}$ 이며, 육지로 둘러싸인 해양의 경우 수온은 좀 더 높을 수 있지만, 일반적인 해양에서의 수온은 30°C 를 넘지 않는다(Sverdrup 등, 1952). 따라서 해양에서 수온의 수평적인 변화가 극대치가 될 수 있는 환경을 가정하여 LDI를 산출하는 실험을 하였다. 실험을 위한 해역은 임의로 $10 \times 10\text{ km}$ 크기의 격자로 구성하고 격자의 중앙 점에 최고 수온 40°C 를, 격자의 경계선에 최저 수온 0°C 를 지정하여 그림 4와 같은 실험해역 내에서 수평적인 수온차가 40°C 가 되도록 설계하였다. 격자의 중앙 점에 최고치를 지정해 준 이유는 0.1°C 등온선을 제작하였을 때 격자 내 등온선의 총 길이가 최대가 되도록 하기 위해서이다. 격자 내에서 0.1°C 등온선을 GIS 라인

데이터로 제작한 결과는 그림 5와 같이 400개의 등온선이 매우 밀집되어 분포한다. 여기서 등온선의 총 길이는 0.763×10^7 m, 면적은 10^8 m²로 line의 총 길이 대 해당 면적의 비가 0.763/10으로, LD는 0.0763, LDI는 89.48로 나타났다. 그리고 해수를 냉각용수로 사용한 후 다시 온수를 해양으로 배출하는 해안에 위치한 발전소 주변해역의 경우 국지적으로 여름에 수온이 40~45°C에 달하는 경우도 있다(윤이용과 박재규, 2000). 이러한 특이 상황의 경우를 최대한 고려하여 위와 동일 실험해역에서 수평적인 수온차가 50°C가 된다는 가정을 하더라도 LD가 0.0954, LDI는 98.00이 된다. 이러한 실험 결과에 의하면, LDI 식의 제약 사양으로 설정한 line의 총 길이가 해당 면적의 1/10을 넘지 못한다는 조건이 타당함을 보여준다.

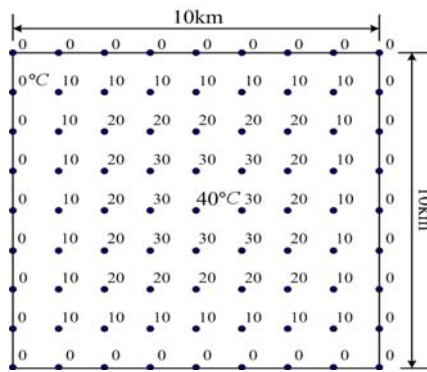


FIGURE 4. Experimental design to test the permissible range of LD (0~0.1)

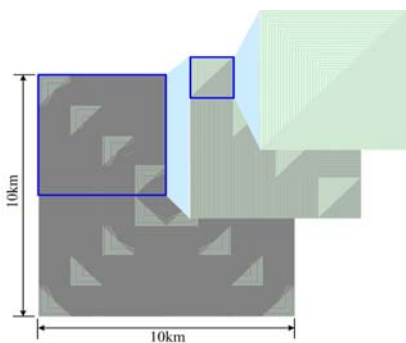


FIGURE 5. 0.1°C isothermal lines in the test area

또 한 가지 검토해야 할 사항은 수온전선을 나타내기 위해 선밀도 지수 대신 간단히 “단위 영역 내 수온 값의 차이(ΔT °C)로 나타내면 되지 않겠는가?” 하는 문제이다. 이러한 문제에 대한 답을 제시하고자 그림 6과 같이 100×100 m 격자 내에서 일정한 간격으로 배치된 0.1°C 등온선을 가정하였다. 물론 단위면적은 1×10^4 m² 내에서의 수온차(ΔT)는 0.7°C이며, 등온선의 총 길이는 565.6 m이므로 LDI는 80.16이 된다. 동일한 수온 조건하에서 격자의 크기인 단위면적을 75×75 m, 50×50 m 및 25×25 m로 변화시키면, ΔT 는 각각 0.5°C, 0.3°C, 0.1°C로 변하지만 LDI는 모두 80.16이 된다. 따라서 연구해역의 수온전선역을 추출하기 위해 단위영역의 크기를 일정한 크기로 고정시키지 않고 가변 격자 또는 부정형의 폴리곤으로 설계할 경우 ΔT 값은 변하지만, LDI는 일정한 지수로써의 수온전선 값을 얻을 수 있게 된다.

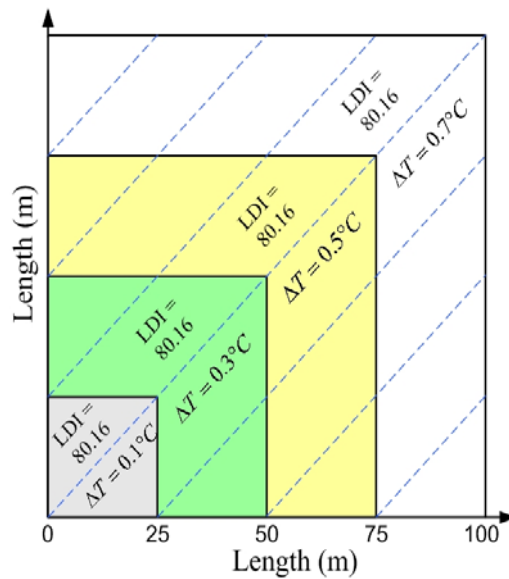


FIGURE 6. Comparison of LDI and ΔT with the change of unit area - dot lines are 0.1 °C isothermal lines

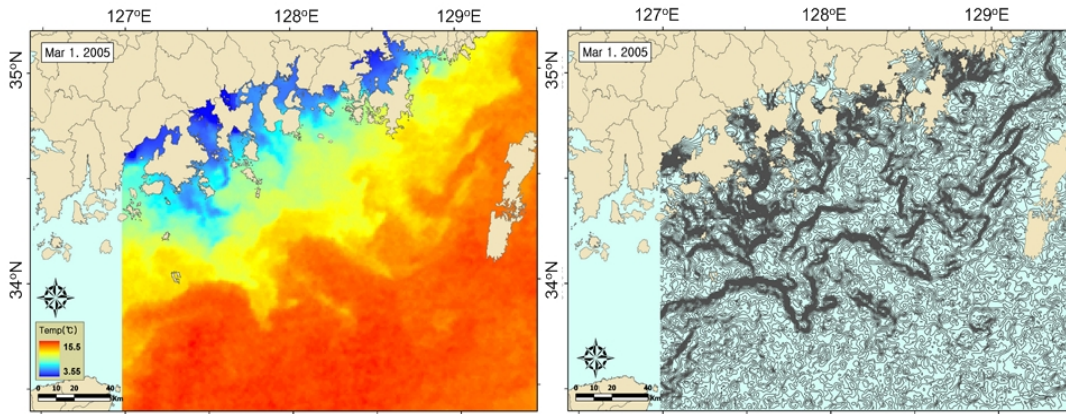


FIGURE 7. SST raster and 0.1°C isothermal line in the South Sea of Korea (Mar. 1, 2005)

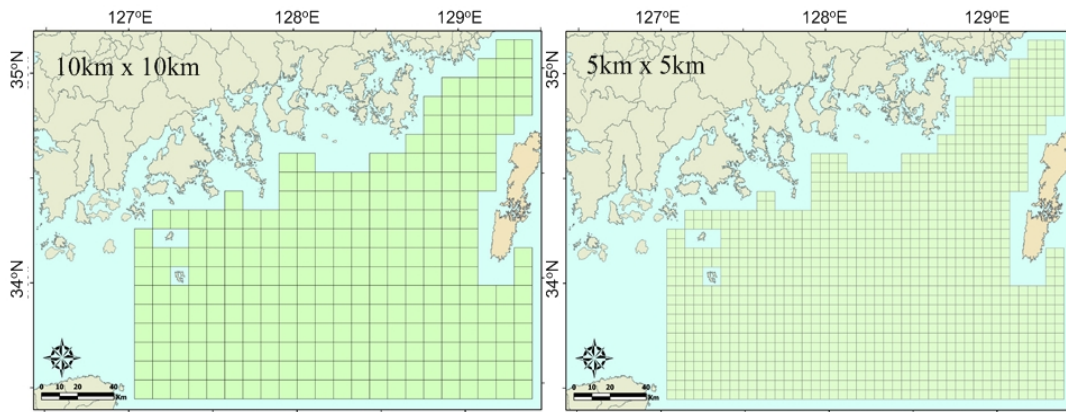


FIGURE 8. Two schemes of spatial lattices for LDI calculation (left: 10×10 km, right: 5×5 km)

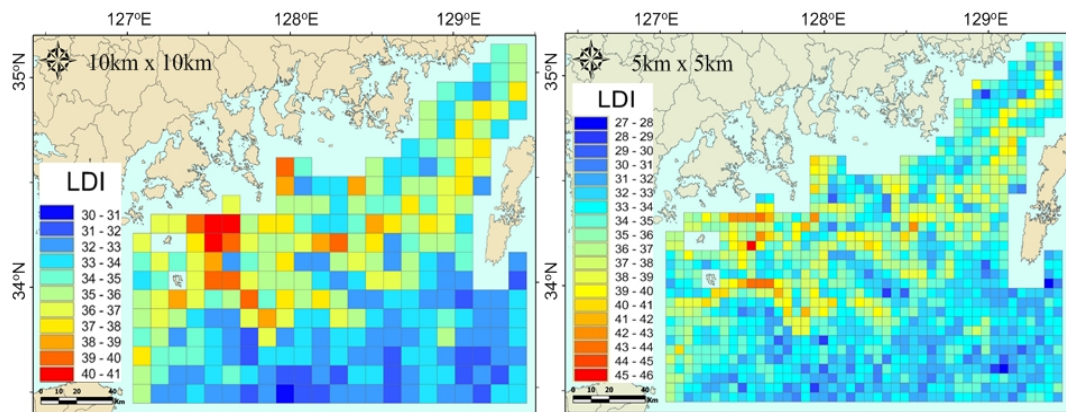


FIGURE 9. Mapping of LDI for the two schemes of lattices

3. 선밀도 지수의 실험 적용

우리나라 남해역은 남해연안수와 외해역의 고온과 고염분의 대마난류수가 상충하는 해역으로 수온전선이 비교적 잘 형성되어 연구대상 지역으로 설정하였다. 2005년 3월 1일에 관측한 NOAA AVHRR SST 자료를 이용해, 0.1°C 등온선 벡터 데이터를 추출하고 LDI를 계산하였다. 수온 전선역 추출을 위해 실제 해역에 LDI 적용 시 나타날 수 있는 문제점을 검토하기 위해 단위영역의 격자크기를 다르게 설정하여 LDI의 차이를 비교하였고, LDI와 ΔT 의 선형 회귀식으로부터 수온전선역에 해당하는 LDI 영역의 ΔT 를 구하여 기존 연구자들이 제시한 수온 전선역의 수평경도($\Delta T^{\circ}\text{C}/\text{km}$)와 비교하였다.

본 실험을 위해 남해의 해수면온도 분포를 GIS 레스터로 제작하였으며, 레스터 데이터로부터 0.1°C 등온선 데이터를 추출하였다(그림 7). 고온의 대마난류수가 제주도 북동 해역에서부터 대한해협을 지나면서 저온의 연안수와 경계를 이루며 다소 복잡한 사행 구조의 수온 전선이 형성되어 있음을 알 수 있다.

공간 격자크기에 따른 LDI의 차이를 검토하기 위해, 연구지역의 격자 크기를 10×10 km와 5×5 km 정방형으로 각각 설계하여 GIS 폴리곤 데이터로 제작하였다(그림 8). 격자 폴

리곤과 중첩되는 0.1°C 등온선인 라인 데이터의 총 길이를 계산하여 선밀도(LD)를 계산한 후, 다시 LDI를 계산하여 실험연구 해역의 각 격자 폴리곤상에 LDI를 매핑한 결과는 그림 9와 같다.

두 격자 크기에 따른 LDI의 차이를 좀 더 구체적으로 살펴보기 위해, LDI 값의 빈도수에 대한 히스토그램을 그림 10과 같이 그려보았으며 표 2와 같이 기술통계와 정규성 검정을 수행하였다. 히스토그램에서 보는바와 같이 격자 크기가 10×10 km일 때 보다는 지역을 세분화한 5×5 km일 때의 LDI 분포 범위가 세분화되고 확장됨을 알 수 있다. 이러한 특성 차이를 표 2와 같이 통계적으로 살펴보면 두 가지 격자 크기에 따른 LDI의 평균은 34.46과 34.30으로 비슷하나 범위, 분산, 표준편차, 변이계수(CV) 등이 10×10 km 보다는 5×5 km일 때 더 크게 나타났다. 하지만 5×5 km인 경우가 표본 수의 크기에 영향을 받아 표준오차는 더 작게 나타나 정밀도가 10×10 km보다는 높았다. 두 격자크기에 따른 LDI의 정규성 검정도 Shapiro-Wilk 방법으로 수행해 보았다. Shapiro-Wilk 검정통계량(W) 값의 범위는 0에서 1까지이며 1에 가까울수록 정규분포에 가깝다는 것을 의미한다(김충련, 2000). 두 가지의 경우 모두 검정통계량(W) 값이 0.95로

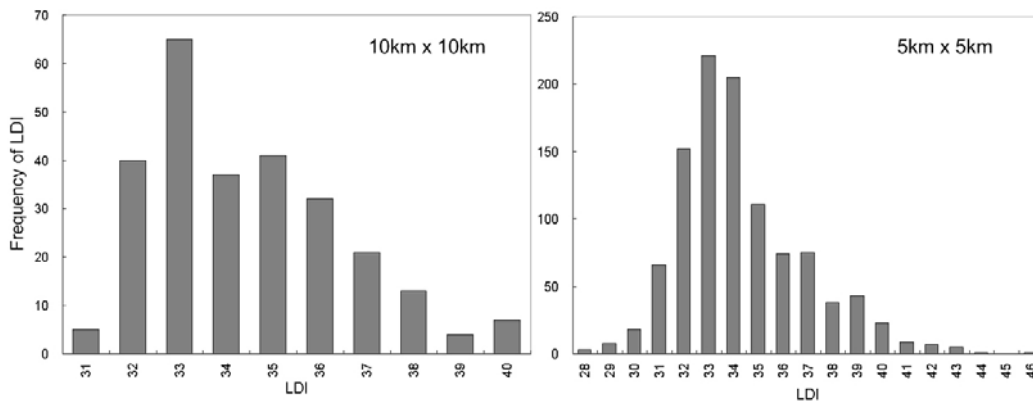


FIGURE 10. Histogram of LDI frequency on the two schemes of lattices

나와 정규분포에 가까운 분포특성을 보였다. 이와 같이 격자 크기에 따라 LDI의 평균이나 정규분포와 같은 고유특성은 변하지 않으나, 값의 범위와 분산, 표준편차와 같은 특성의 차이가 발생하는 이유는 등온선 구조가 이상 상태(ideal case)처럼 공간적으로 일정하게 배치되어 있지 않고, 실제 연안형 해역에서는 그림 7의 등온선처럼 복잡한 모양으로 분포하기 때문이다.

TABLE 2. Results of the descriptive statistics and normality test

Moments	LDI (10 × 10 km)	LDI (5 × 5 km)
sample size	265	1,060
range	9.59	17.79
mean	34.46	34.30
variance	4.28	6.52
standard deviation	2.07	2.55
standard error	0.13	0.08
CV (coefficient of variation)	6.0	7.4
W: Shapiro-Wilk normal test	0.95	0.95

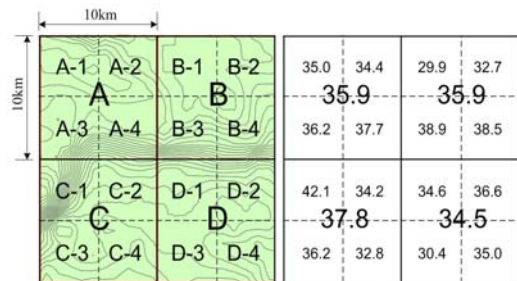


FIGURE 11. Difference of LDI according to the lattice size (bold lines are 10×10 km and dot lines are 5×5 km lattices)

그림 11은 그림 7의 등온선 분포도의 일부분을 10×10 km와 5×5 km의 격자 폴리곤에 중첩하여 LDI를 계산한 결과이다. 그림에 의하면 등온선이 밀집된 수온전선이 10×10 km

격자에서는 A, B, C, D 구역을 지나지만, 이 구역을 다시 5×5 km로 세분하였을 때는 A-3, A-4, B-3, B-4, C-1 구역을 지나게 된다. 10×10 km 격자 구역에서는 등온선이 밀집된 지역과 완만한 지역을 함께 포함해 LDI를 구하게 되므로 수온전선의 특성을 놓치게 되어 A 구역의 LDI가 35.9가 되지만, 5×5 km 격자 구역으로 세분하게 되면 35.0, 34.4, 36.2, 37.7로 값의 범위가 늘어나게 되고 등온선이 밀집된 지역과 완만한 지역을 구분시킬 수 있게 된다.

해양에서 해수면 수온전선의 공간적인 규모는 O(1)에서부터 O(1000) km에 이르기까지 매우 다양하다(Fedorov, 1986). 따라서 본 실험연구 해역과 같은 남해에서는 5×5 km의 격자가 적당한 규모이지만 동해 및 동지나 해역과 같은 외해역에서는 보다 큰 격자구조가 적당할 것이며, 연안역과 외해역을 포함하는 우리나라 전 해역을 대상으로 수온전선을 추출할 때에는 가변격자 지역구조로 설계함이 바람직 할 것이다.

그림 7의 등온선 분포 현황과 5×5 km 격자에서의 LDI 값과의 관계를 파악하여 등온선이 밀집된 수온전선역을 LDI 36.0 이상인 지역으로 설정하였다. 이 지역을 격자 폴리곤상에서 선별하여 매핑한 결과는 그림 12와 같으며, 수온전선역을 잘 나타내 주고 있다.

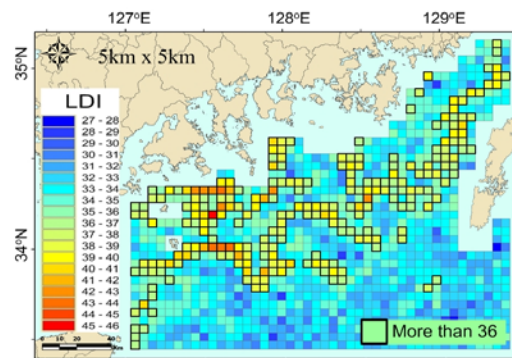


FIGURE 12. Thermal fronts map selected from LDI (more than 36.0)

또 한 가지 검토할 사항은 LDI 계산에 사용된 라인 중 수온 값이 같은 것들도 있을 수 있다는 점이다. 즉, 수온이 격자 내에서 한 방향으로 증가 또는 감소하지 않고 증가와 감소가 공존하는 경우로 단위격자내의 등온선이 각기 다른 객체로 존재하지만 수온 값이 같은 속성을 지닌 경우를 말한다. 이러한 점을 파악해봄과 동시에 위에서 설정한 LDI 36.0과 기존 연구자들이 제시한 수온전선역에서의 수온 수평경도 값들과 어떤 차이가 있는지를 비교·검토하고자 하였다.

LDI를 계산하기 위해 0.1°C 등온선을 선형화한 격자 내에 포함된 라인의 속성(수온) 차이를 이용하여 속성이 각기 다른 등온선 라인의 개수를 발췌한 후, 라인의 개수에 0.1°C를 곱하여 격자 내 수온 차(ΔT)로 계산하였다. 먼저, ΔT 와 LDI와의 관계를 분석한 결과 피어슨 상관계수가 0.928로 추정율이 86.1%로 나타났다(그림 13). 그림 12에서와 같이 LDI가 36.0 이상인 지역을 수온전선역으로 설정하였을 때, 수온전선역의 수온 수평경도 값을 선형회귀모델식인 $LDI = 30.75 + 5.35 \times \Delta T$ 에 의해 구하였다. 모델식에 의하면 LDI가 36.0일 때 ΔT 는 0.981°C이며, 5km × 5km 격자에서 최소치 5km와 최대치(격자의 대각선 길이) $5\sqrt{2}$ km를 평균한 6 km를 평균 수평거리로 설정하여 수온 수평경도 값을 계산하면 0.164°C/km가 된다. 따라서 2005년 3월 1일의 남해 수온전선역의 수온 수평경도 값은 0.164°C/km 이상이 되며, 이는 양영진 등(1998)이 제시한 연안형 수온전선의 수온 수평경도 0.116°C/km 보다는 크지만 기존 연구자들이 제시했던 포괄적인 범위(0.031~0.375°C/km)에는 포함되는 결과를 보였다.

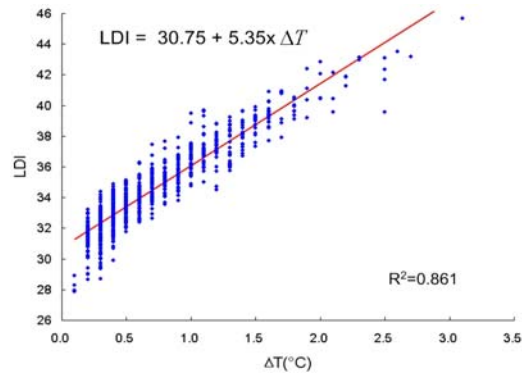


FIGURE 13. Correlation between temperature difference and LDI for the lattice of 5 × 5 km

결론

해양에서 등온선 분포의 밀집도가 강한, 즉 수온의 수평경도가 큰 지역을 수온전선역이라 한다. 이러한 수온전선역을 제시할 때 그 동안 “어떤 해역에 수온전선이 형성되어 있다.”라는 정성적인 접근이 일반적이었고, 정량적인 수치로 표현하는 방법으로는 수온의 수평경도(ΔT °C/km)를 사용하여왔다. 최근 들어 GIS를 이용해 등온선을 kernel 방법에 의한 선밀도로 계산하여 선밀도 값이 높은 지역을 수온전선역으로 제시하는 연구가 있었다(Schick 등, 2004). 본 연구에서는 이러한 선밀도를 보다 표준화된 지표로 사용 가능한 선밀도 지수(LDI)식을 개발하여, 이에 대한 사용조건을 제시하고 이상 상태(ideal case)의 해양조건에서 타당성 검증실험을 수행하였다.

또한, 남해역을 관측한 NOAA 위성 SST 자료를 이용하여 LDI를 계산하여 수온전선을 추출하는 실험연구를 수행하였다. 적용실험 결과 2005년 3월 1일 남해의 수온전선역은 LDI가 36.0 이상으로 나타났으며, LDI를 계산하기 위해 설계하는 단위영역의 격자크기가 수온전선역을 보다 정밀히 추출할 수 있는 중요 요소

임을 알 수 있었다. 이것은 남해처럼 연안형 수온전선이 형성되는 해역에서는 수온전선 구조가 복잡하고 전선의 폭도 5 km 이하이기 때문에 본 적용 실험에서와 같이 격자크기를 10×10 km로 설정했을 때 등온선이 밀집된 전선지역과 완만한 지역이 혼합되어 전선의 특성을 추출하지 못하는 경우도 발생할 수 있게 된다.

격자 내 등온선 라인 데이터가 지닌 수온 속성 값을 이용하여 수온 차(ΔT)를 추출한 후, 수온의 수평경도를 계산하여 LDI와의 관계성을 검토하였다. 분석 결과 선밀도를 이용한 LDI와 ΔT 의 관계는 결정계수가 0.86으로 나타나 일부 지역에서는 등온선의 증감이 공존함을 알 수 있었다. 이는 LDI로 추출한 수온전선역이 실제 ΔT 에 의한 전선역을 반영할 수 있는 추정율이 86%임을 의미하는 것으로, 등온선 구조의 복잡함 정도에 따라 LDI가 수온전선역을 완벽하게 대표하지 않는다는 사실도 감안해야 할 사항이다.

도로가 생태학적으로 장벽(barrier)역할을 하듯이, 해양의 수온전선 또한 두 수괴가 만나는 경계역으로 무기적, 유기적 해양환경의 장벽 역할을 한다. 이러한 특성을 제시한 사례로 이동섭(1999)은 수온전선이 영양염의 분포에 영향을 미치는 중요한 요인으로 분석하였고, 양영진 등(1999)은 남해 선망어장의 형성이 수온전선역의 위치와 상호 밀접한 관계가 있다고 하였으며, 김성과 유재명(1999)은 수온전선역을 경계로 치자어의 종 분포가 다를 것을 제시하였다. 이와 같이 수온전선역을 지수화 함으로써 시·공간적 변화에 무관한 일관성 있는 전선형성 지역의 해석이 가능함은 물론, 보다 의미 있는 것은 수온전선과 해양환경 또는 해양생물과의 관계를 정량적으로 분석할 수 있는 기반을 제시하였다는 점이다.

수온 뿐 아니라 해양에서의 염분 범위가 0~40 PSU 이므로, 본 연구에서 개발한 LDI는 수온전선 지수 뿐 아니라 염분전선 지수로도

활용 가능할 것이며, 기타 선형화가 가능한 자료항목에 대해서도 LDI의 적용이 가능할 것으로 생각되어 LDI의 확장 실험이 요구된다. 또한 GIS 기반에서 등온선의 선형화, GIS 구조화 편집 및 LDI 계산 등 제반 작업처리 과정을 체계화시키면 광역 및 다중시기의 자료에 대해 수온전선역 추출과 매핑을 빠르고 효율적으로 수행할 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 연구사업(PN52700)과 한국해양연구원 기본연구사업(PE97104)의 지원으로 수행되었습니다. **KAGIS**

참 고 문 헌

- 김경중. 1989. 한국의 경제지표. 매일경제신문사. 752쪽.
- 김성, 유재명. 1999. 여름철 대한해협 전선구조에 따른 치자어의 분포 특성. 한국어류학회지 11(1):72-85.
- 김충련. 2000. SAS 라는 통계상자. 데이터플러스. 592쪽.
- 나정열, 한상규, 조규대. 1990. 한반도 근해의 해류와 해수 특성 -남해연안수 확장과 수온변화-. 한국수산학회지 23(4):267-279.
- 양영진, 김상현, 노홍길. 1998. 한국 남·서해 및 동중국해 북부해역에 출현하는 수온전선. 한국수산학회지 31(5):695-706.
- 양영진, 김상현, 노홍길, 정동근. 1999. 한국 남·서해 및 동중국해 북부해역에 출현하는 수온전선과 선망어장과의 관계. 한국수산학회지 32(5):618-623.
- 윤이용, 박재규. 2000. 해양오염. 동화기술. 204쪽.
- 이동섭. 1999. 여름과 겨울철 남해의 영양염 분포 특성. 한국해양학회지 4(4):371-382.
- 한상복, 서영상. 1992. 원격탐사기술에 의한 수온전선대 도식화의 간단한 방법. 수진연구보고 46:1-6.

- Fedorov, K. N. 1986. The physical Nature and Structure of Oceanic Fronts. Springer-Verlag, New York.
- Forman, R. T. T. and L. E. Alexander. 1998. Roads and their major ecological effects. *Annual Review of Ecology and Systematics* 29:207-231.
- Gong, Y. and S. J. Son. 1982. A study of oceanic thermal fronts in the southwestern Japan Sea. *Bull. Nat'l. Fish. Res. Dev. Agency* 28: 25-54(in Korean).
- Kang Y. Q., S. B. Hahn, Y. S. Suh and S. J. Park. 2001. Variation of SST around Korea inferred from NOAA AVHRR data. *J. of Korean Remote Sensing* 17(2):183-188.
- McCoy, J. and K. Johnston. 2002. Using ArcGISTM Spatial Analyst. ESRI. 232pp.
- Mech, L. D. 1989. Wolf population survival in an area of high road density. *American Midland Naturalist* 121(2):387-389.
- Park J. H. and K. H. Choi. 1995. A study on the Fishing Ground and the Prediction of Fishing Conditions of Mackerel, *Scomber Japonicus Houttuyn*. *Bull Nat. Fish. Res. Dev. Agency* 49:25-35.
- Schick, R. S., J. Goldstein and M. E. Lutcavage. 2004. Bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) distribution in relation to sea surface temperature fronts in the Gulf of Maine (1994-1996). *Fisheries Oceanography* 13(4):225-238.
- Sverdrup, H. U., M. W. Johnson and R. H. Fleming. 1952. *The Oceans*, Prentice Hall. 1087pp.
- Uda, M. 1959. Oceanographic Seminars, 2, Watermass boundaries- "Siame", Frontal theory in Oceanography. Fish. Board, Can, Ms Rep. Ser. (Oceanogr. Limnol.) 51:10-20.
- Ullman, D. S. and P. C. Cornillon. 1999. Satellite-derived sea surface temperature fronts on the continental shelf off the northeast U.S. coast. *Journal of Geophysical Research* 104(23):459-478.
- Yoon H. J., H. K. Byun and K. S. Park. 2005. Temporal and Spatial Variations and Ocean Fronts in the Korean Seas by Empirical Orthogonal Function Analysis. *Korean Journal of Remote Sensing* 21(3):213-219. [KAGIS](#)