

엘니뇨와 라니냐가 한국 동해 연안용승에 미치는 영향

서호산* · 김동선**†

* 부경대학교 해양산업개발연구소 연구원, ** 부경대학교 생태공학과 교수

Effect of El Niño and La Niña on the Coastal Upwelling
in East Sea, South Korea

Ho-San Seo* · Dong-Sun Kim**†

* Researcher, Research Center for Ocean Industrial Development, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

** Professor, Department of Ecological Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

요약 : 본 연구는 51년 장기(1967-2017년) 수온 관측자료와 ONI(Oceanic Niño Index)를 이용하여 El Niño와 La Niña가 한국 동해 연안용승 발생에 미치는 영향을 파악하였다. 수온의 시계열분석 결과 하계 연안용승 발생빈도가 동해남부(울기~감포) 연안에서 가장 높았다. 하계 ONI가 2.5 이상 급감하는 연변동이 발생한 1987-1988년과 1997-1998년에 동해 전 연안역(부산~고성)의 수온이 4~7 °C 급상승하였다. ONI가 1.5 이상으로 El Niño가 강한 1987, 1997년과 ONI가 -0.8 이하로 La Niña가 강한 1988, 1998년 동해 연안역의 수온구조가 서로 다르게 나타났다. El Niño가 강한 시기 연안해역의 이상 수온은 음의 값으로 비교적 차가운 냉수괴가 분포한다. 이는 수온 경계층경사(Baroclinic tilting)가 강해 연안역의 수온 성층 형성 수심이 얕아지기 때문이다. La Niña가 강한 시기는 El Niño가 강한 시기와 반대로 이상 수온은 양의 값으로 수온이 높게 나타났다. 또한 수온의 경계층경사가 El Niño가 강한 시기에 비해 약해 수온 성층이 El Niño가 강한 시기보다 깊은 곳에 형성된다. El Niño가 강한 시기 얕은 수심에 수온성층이 형성되는 현상은 하계 남풍계열의 바람에 의한 연안용승이 발생할 확률을 높일 수 있다. 반대로 La Niña가 강한 시기에는 남풍계열의 바람이 지속적으로 불어도 연안용승이 발생할 확률이 작다. 왜냐하면, 수온성층이 El Niño가 강한 시기에 비해 깊은 수심에서 형성되기 때문이다.

핵심어 : El Niño, La Niña, 연안용승, 경계층경사, 수온성층

Abstract : This study investigated the effects of El Niño and La Niña on coastal upwelling in the East Sea of Korea using long-term (1967-2017) water temperature observation data and Oceanic Niño Index (ONI). As a result of time series analysis of water temperature, the occurrence frequency of summer coastal upwelling was the highest in the southeastern (Ulgi ~ Gimpo) coast. In 1987-1988 and 1997-1998, when the annual fluctuations of ONI plunged more than 2.5, the water temperature in whole coast areas of the East Sea (Busan ~ Goseung) rose by 4 ~ 7 °C. The temperature structure of the East Sea coastal water was different when El Niño was strong with ONI above 1.5 and La Niña with strong ONI below -0.8. When El Niño is strong, the water temperature anomaly in coastal waters is negative. This is due to the strong baroclinic tilting and the formation of shallow temperature stratification in the coastal waters. The strong La Niña season is opposite to the strong El Niño season, whereas the water temperature anomaly is positive. In addition, the baroclinic tilting is weaker than the time of strong El Niño and the temperature stratification is formed deeper than the time of strong El Niño. The formation of temperature stratification at shallow depths when El Niño is strong can increase the probability of occurrence coastal upwelling caused by southerly winds in the summer season. On the contrary, when La Niña is strong, occurrence of coastal upwelling is less likely even if the southerly wind blows continuously. This is because the temperature stratification is formed at deeper than when El Niño is strong.

Key Words : El Niño, La Niña, Coastal upwelling, Baroclinic tilting, Temperature stratification

* First Author : sasa9668@nate.com, 051-629-7071

† Corresponding Author : kimds@pknu.ac.kr, 051-629-7374

1. 서론

한국 동해연안의 해저지형은 200 m 수심의 대륙붕단 이후 수심이 급격히 깊어지며, 경상북도 앞바다의 해저용기부(후포퇴), 감포 앞바다부터 남쪽으로 갈수록 대륙붕이 넓어지는 특징이 있다. 또한 한국 동쪽 연안을 따라 북향하는 쓰시마난류(TWC: Tusuhima Warm Current)의 지류인 동한난류(EKWC: East Korea Warm Current)와 북쪽에서 동해연안을 따라 남향하는 북한한류(NKCC: North Korea Cold Current)가 존재하며 이 두 난류와 한류는 북위 37~41°에서 만나 사행하는 형태의 극전선을 형성한다(Fig. 1). 이와 같이 한국 동해연안해역은 지형특성, 동한난류와 북한한류의 상호작용과 기상(바람·태풍 등) 등의 환경 요소에 의해 복잡한 해황이 나타난다.

한국 동해연안에서는 하계를 중심으로 냉수대가 빈번하게 발생하고 있다. 이는 하계 동해 연안용승현상에 의한 결과로 나타나는 것으로 잘 알려져 있다. 한국 동해연안용승에 관해서는 오래전부터 연구가 행해져 왔다. Nishida(1926)의 관측에 의하면 한국 남동해역에서 수년주기로 냉수가 표면으로 노출되는 현상이 나타났다. 동해의 여러 냉수역은 쓰시마난류의 와류에 의해 형성될 수 있고(Tanioka, 1968), 해저 지형의 영향을 받기도 한다(Shimomura, 1957). 한국 동해연안에서는 발생하는 용승현상과 용승으로 인해 형성되는 냉수대에 관한 국내연구는 1960년대부터 현재까지 약 60년간 꾸준히 진행되어 왔다. Lim and Chang(1969)과 Gong and Park(1969)은 한국 동쪽 연안에서 냉수대가 발생한다고 하였다. 그리고 그 냉수대는 강한 쓰시마난류와 바람에 의한 연안 용승 현상으로 인해 나타난다고 연구된 바 있다(Ann, 1974; Seung, 1974; Lee, 1983). 용승에 의해 한국 동해 연안역에 출현하는 냉수대는 생산성이 높은 해수로 외해로 확장하여 동해의 생산량을 높이는 긍정적인 영향은 이미 잘 알려져 있다(Lee et al., 2004; Yang et al., 1998; Yoo and Park, 2009). 용승은 저층의 해수가 표층으로 상승하는 현상으로 차가운 상태인 저층수에 고농도로 분포하는 영양염을 유포층으로 부상시킨다. 표층으로 회귀된 저층수에 의해 표층수온이 낮아지며 해역의 기초생산력이 높아진다. 해양에서의 높은 기초생산력은 곧 어획량 증가를 의미한다.

그러나 연안역에서의 냉수대 출현은 부정적으로 환경에 영향을 미치기도 한다. 2013, 2018년 하계 동해남부 연안에서 발생한 냉수는 연안에 위치한 양식장의 어류를 폐사시켰다. 동해 구룡포 연안의 해상가두리방식으로 양식하는 주어종인 돌류와 방어 등은 10℃ 이하로 수온이 급감하면 어종의 생존에 위협을 줄 수 있으며, 최대풍속과 풍향을 이용한 용승발생지수가 2일 평균 100 이상일 때 어류 폐사가 발

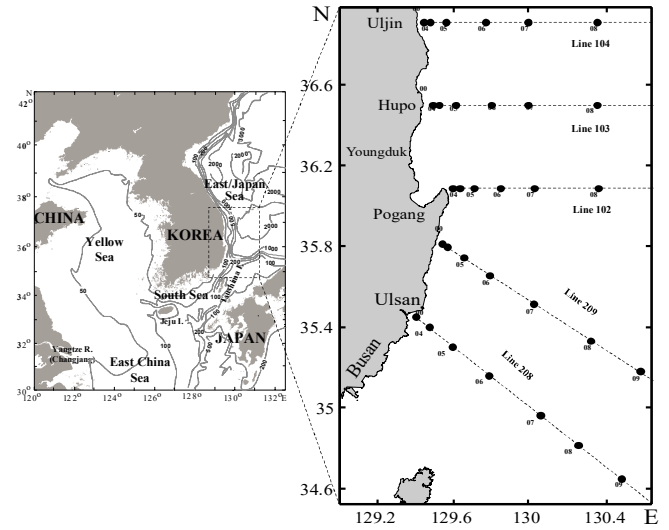


Fig. 1. Location of bottom topography (left) and observation (temperature) stations in East Sea of Korea (right).

생한다고 하였다(Lee et al., 2016). 또한 냉수대 출현으로 발생하는 해무는 교통 및 선박사고를 유발할 수 있다(Hahn et al., 1995).

이와 같은 결과는 용승의 발생과 냉수대의 출현은 인간의 생활에 미치는 영향이 크고 밀접한 관계가 있음을 말해준다. 이런 측면에서 볼 때 연안용승과 냉수대에 관한 연구는 꾸준히 지속될 필요가 있다.

태평양 적도해역에서 발생하는 ENSO 현상(El Niño - Southern Oscillation)은 중위도지방까지 영향을 미치며 한반도 주변 기후변화에도 큰 영향을 미치고 있다. Yoo and Kim(2004)는 ENSO 현상이 한국 동해 남부해역의 Spring bloom과 관련있을 수 있다고 하였다. 또한 Hong et al.(2001)은 동해의 표층수온은 ENSO와 관련이 있으며 El Niño 발생시기의 여름철 표층수온은 El Niño 발생 전해보다 낮아지고 겨울에는 반대로 El Niño 발생 전년도보다 높아진다고 하였다. Kim et al.(2011) 또한 ENSO의 장주기 변동은 수온의 변동과 반대를 보이나 봄철과 겨울철에 한반도 주변 수온이 상승하는 경향이 나타난다고 하였다.

지금까지 한국 주변해역에 장주기 수온변화에 영향을 미치는 ENSO현상과 동해 연안에서 하계 국지적으로 발생하는 용승현상은 발생 주기가 달라 관계성이 떨어져 별개의 연구로 진행되어 왔다. 용승과 냉수대 발생의 원인이 되는 각 요소와 기작이 복잡한 만큼 그 요소에 영향을 줄 수 있는 새로운 요소들과 복합적인 분석이 지속적으로 이루어져야 한다.

따라서 본 연구에서는 한국 동해 연안용승과 냉수대 출현에 대한 선행 연구(1969~2019) 결과를 통해 용승 발생의 주

요 원인을 파악하고, El Niño와 La Niña가 연안용승 발생에 어떠한 영향을 주는지 파악하고자 한다.

2. 자료 및 방법

2.1 선행연구

현재까지 국내·외 학술지에서 한국 동해 연안 용승과 관련된 선행 연구 논문을 수집하였다. 외국학술DB 중 국내 대학에서 가장 많이 구독하는 해외 전자저널인 Science direct (<https://www.sciencedirect.com/>)에서 ‘Coastal upwelling’ 필터적용 없이 검색한 결과는 25,872개로 상당히 많은 수의 논문이 검색된다. 그 중 논문 제목에 ‘Coastal upwelling’이 들어가 있는 논문은 204개로 전 세계에서 연안용승과 관련한 연구가 활발하게 이루어지고 있음을 알 수 있다.

또한 한국 동해연안의 연안용승 및 냉수대와 관련된 논문들 중 연안용승과 냉수대의 발생 기원 및 기작에 관한 연구 논문은 1969년부터 2018년까지 총 26편이 수집되었다.

위 연구논문들은 한국 동해연안에서의 연안용승 발생과 냉수대 출현에 대한 약 50년간(1969~2018)의 연구기록으로 시대별 자료취득 특성 및 각 논문에서 중점적으로 다루는 용승 발생을 환경 요인별로 정리하였다.

2.2 수온 관측 자료

국립수산과학원 한국해양자료센터에서 제공하는 해양관측자료 중 1967년부터 2017년까지 51년간 하계 수온자료를 연안정지관측자료와 정선관측자료 정점으로부터 수집하였다(<http://www.nifs.go.kr/kodc/index.kodc>).

연안정지관측의 11개 정점(부산, 기장, 울기, 감포, 포항, 영덕, 후포, 죽변, 동해, 주문진, 속초)에서 관측한 표층수온 자료(NIFS, 1967~2017)를 이용하였다. 냉수대 발생시 수온변화 특성을 파악하기 위해 8월 평균수온 그리고 8월 평년편차를 도시하였다. 또한 정선관측자료 중 하계(8월) 수온 분포자료를 이용하여 수온연직분포도 및 수온수평분포도를 도시하여 년도별 하계 수온 공간 분포를 파악하였다. 선행 연구에서 다루었던 연안용승 현상은 주로 7, 8월 발생하였다. 정선관측자료는 년 6회(2, 4, 6, 8, 10, 12월) 수집되어 왔으며 그중 수온 성층이 잘 나타나는 하계의 수온 구조를 파악하기 위해 본 연구에서는 8월의 자료를 이용하였다.

2.3 Oceanic Niño Index

동해 연안역의 수온의 시공간적 분포와 엘니뇨 남방진동의 관련성을 파악하기 위해 NOAA의 Climate Prediction Center (<https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/>) 에서 제공하는 El Niño-Southern Oscillation의 한 척도인 Oceanic Niño Index(ONI)와 8월 평년편

차와 비교분석 하였다. 또한 국립수산과학원 8월 수온 정선 관측자료(NIFS, 1967~2017)를 이용하여 El Niño와 La Niña 시기의 동해 냉수괴의 수온 수평 및 연직분포 특성을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 연안용승 및 냉수대 발생 환경 요소와 메커니즘

지금까지 수행된 연안용승 및 냉수대의 발생 환경 요인은 크게 바람, 해류, 저층냉수분포 그리고 지형특성으로 크게 4가지로 분류할 수 있다.

특히 바람은 연안용승을 발생시키는 가장 중요한 요소로 가장 많은 연구에서 다루고 있다. 1970년대 중반부터 바람자료를 사용하기 시작하였다. 1980년대 초반까지 바람을 원인으로 발생하는 용승에 연구가 집중되기 시작했다. 1980년대 후반부터 위성 원격탐사자료를 이용하면서 연안용승에 관한 연구는 현재에 이르고 있다. An(1974)와 Kim et al.(2010)은 하계 남풍계열의 바람에 의해 감포, 울기 연안에서 냉수대가 발생한다고 하였다. Lee(1983)은 남서풍이 4m/s 이상 풍속으로 3일이 지속되면 용승을 발생시킬 수 있다고 하였다. Seung(1984)은 남풍계열의 바람에 의해 동해 다양한 해역에서도 용승 발생이 가능하다고 하였다. 또한 Kim and Kim(2008)은 육상 관측 바람의 2배인 5.0m/sec 바람을 적용한 수치실험에서 용승현상이 발생한다고 하였다. 그리고 Seo et al.(2017)은 풍향 조건을 달리한 수치실험에서 남풍에 비해 남서풍 조건에서의 용승유량이 약 1.5배 크다고 하였다.

해류 또한 연안용승을 발생시키는 주 요소로 많은 연구에서 다루어지는 항목이며 저층냉수의 분포와도 연관성이 높아 함께 다루어지는 환경요인이다. 1970년대 초 연구(Lim and Chang, 1969; Gong and Park, 1969; Lim, 1973; Ann, 1974)에서는 대한해협 저층에 존재하는 냉수괴 분석에 주목적을 가지고 있었으며, 이 냉수괴를 기원으로 한 용승의 가능성에 대한 연구가 주를 이뤘다. 한편 1990년대 이후 하계 바람에 의한 연안용승의 결과로 나타나는 냉수 출현에 연구가 집중되고 새로운 위성 원격탐사자료 등 다양한 해양자료가 생산되면서 동해 연안의 수괴 및 해류 분석에 관한 연구는 점차 감소하였다. Nishida(1926)의 관측결과 북상하는 난류수 아래 10℃ 등온선을 기준으로 저층냉수가 남하한다고 하였다. Lim and Chang(1969)은 북한한류가 울기연안에 인접하여 남하하며 표층냉수로 나타나고 그 냉수의 흐름은 여름에 강하게 나타난다고 하였다. Seung(1974)와 Lee and Na(1985)는 표층의 난류와 저층 한류의 유속차에 의한 경계층경사(baroclinic tilting)로 인해 수온약층 형성수심이 연안에서 얇게 나타난다고 하였다. Lee et al.(2003), Lee(2011), Lee and Chang(2014) 및 Lee

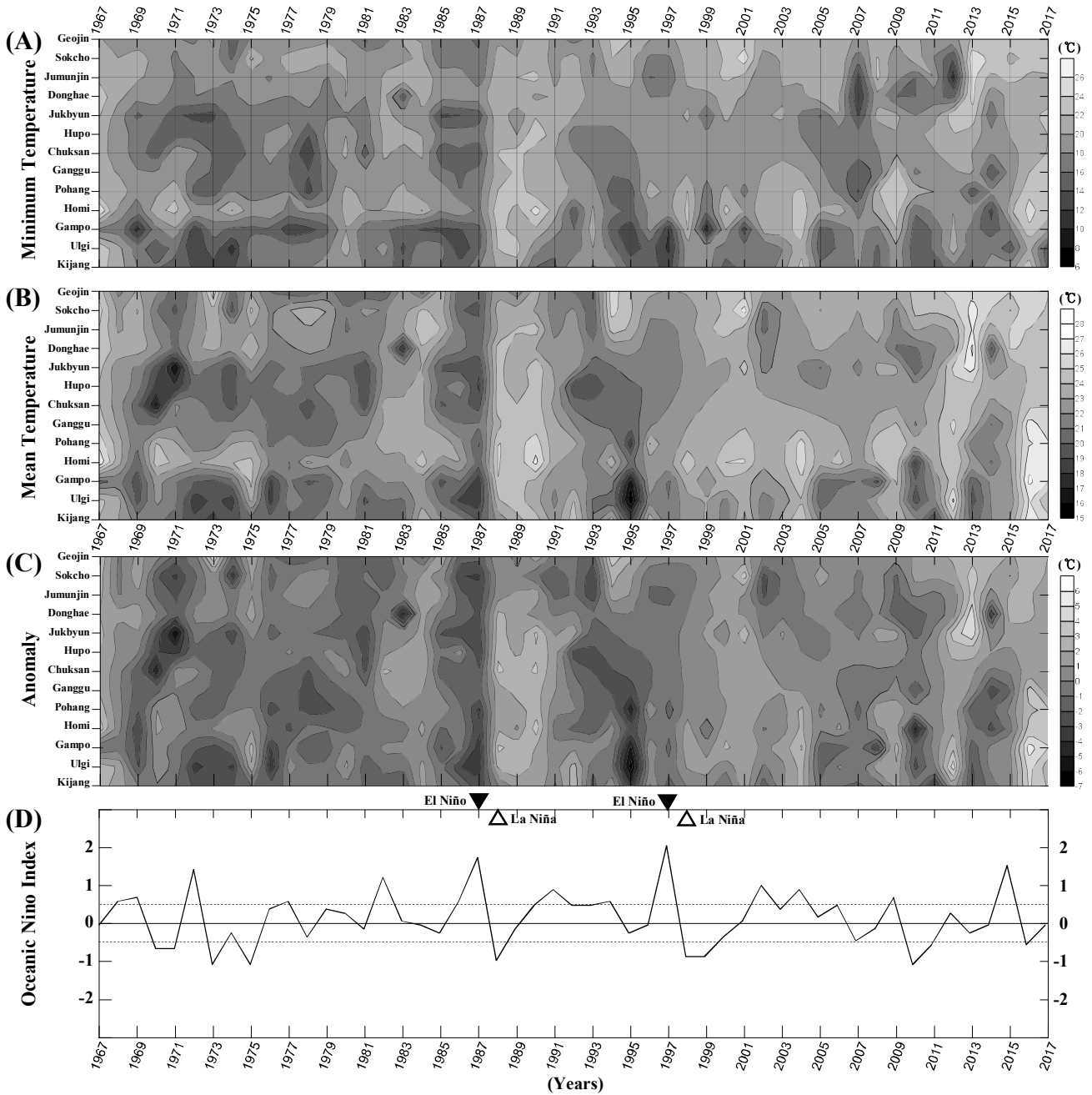


Fig. 2. 51 years (1967~2017, august) time series distribution of minimum temperature (A), mean temperature (B), water temperature anomaly (C) in the Eastern Coast of Korea and Oceanic Niño Index (D).

and Kim(2018)은 동해연안에서 직접 관측한 유동관측자료를 이용하여 연구를 하였으며 강한 난류로 형성되는 경계층경사는 연안용승 발생에 큰 역할을 한다고 하였다.

동한난류의 포텐셜와도 보존에 의해 나타나는 이류현상으로 동한난류가 강해질수록 경계층경사가 발달한다. 경계층경사가 커지면 북한난류가 연안역에 고립되어 성층형성수심이 알아진다. 이러한 현상은 용승의 발생을 도울 수 있

는 우선적 조건이다. 위 조건이 갖추어진 해역에서 하계 지속적인 남풍계열의 바람은 동해연안에 에크만수송을 일으켜 표층아래 차가운 해수를 표층으로 용승시키는 직접적인 작용을 할 수 있다.

3.2 수온 자료 분석

하계(8월) 동해 연안 표층의 최저수온 시계열분포(1967~

엘니뇨와 라니냐가 한국 동해 연안용승에 미치는 영향

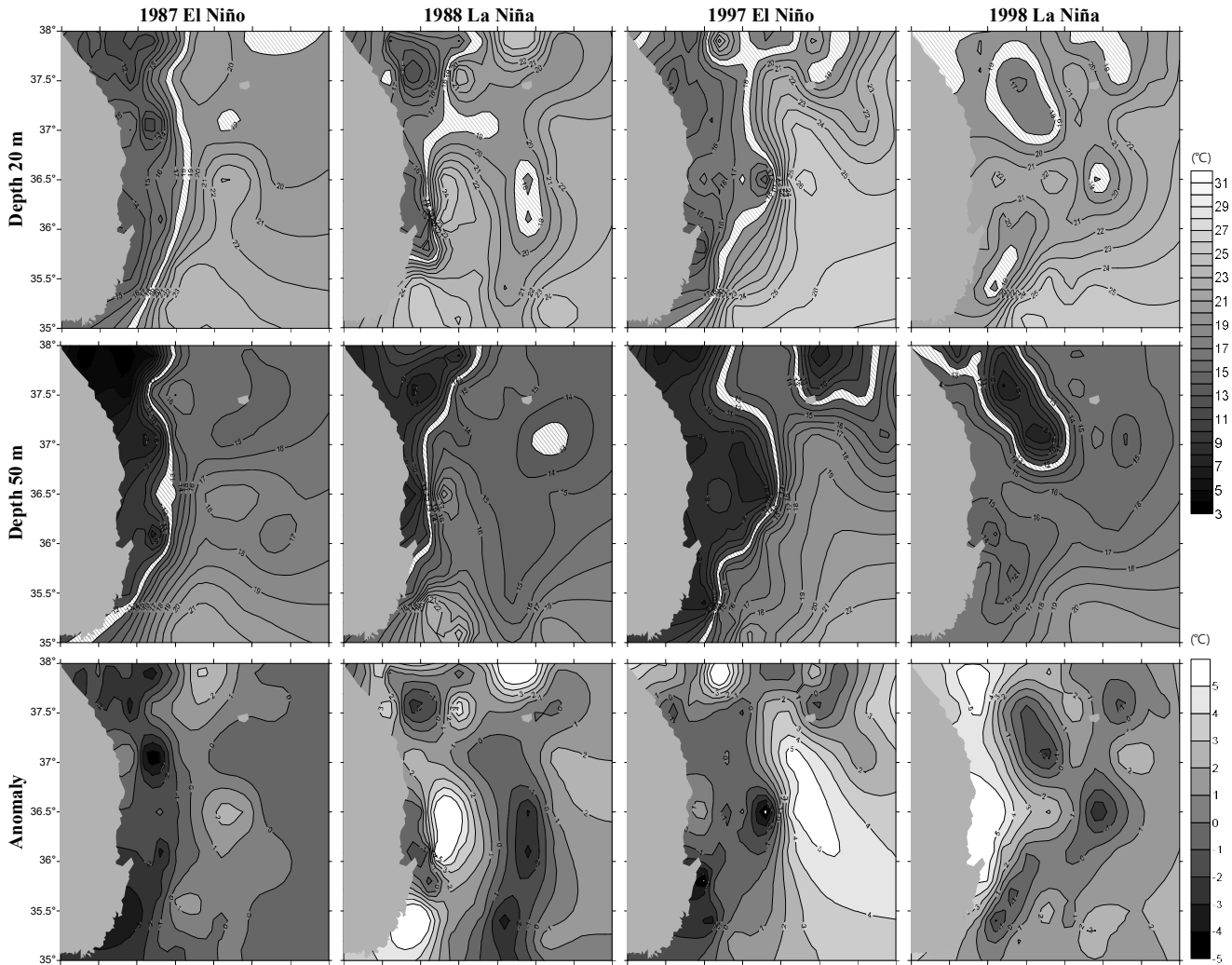


Fig. 3. Horizontal distribution of water temperature at 20 m (upper) and 50m (middle) depths and horizontal distribution of water temperature anomaly at 20m (lower) in El Niño (1987, 1997) and La Niña (1988, 1998).

2017년)를 Fig. 2 (A)에 나타내었다. 동해 연안(부산~속초)의 8월 최저수온의 분포 범위는 10~28°C이다. 위도가 낮은 울기~감포 연안에서의 최저수온이 위도가 높은 포항~속초 연안에 비해 낮게 분포한다. 또한 울기~감포 주변에 위치한 해역과 수온차가 크고 냉수대의 출현이 빈도가 높은 특징이 있다. 울기~감포 해역은 연안 용승 및 냉수대 출현과 관련하여 가장 많은 연구가 진행된 해역이다. Lee(1978)는 1968~1973년 7월과 8월 북쪽에 위치한 속초보다 남쪽의 울기 연안에서 표층수온이 6~8°C 낮다고 하였다. 또한 1974, 1976, 1978년 8월 감포와 울기 앞바다의 수온분포는 주변해역 표층수온에 비해 낮았다(Lee and Na, 1985). 1983년 8월 초 울기 주변해역의 표층수온은 24°C로 일정하게 분포하였으나 3일 후 5°C 낮아졌다고 하였다(Byun 1989). 1972년 7월 감포와 후포연안에서 수온은 10°C 이하로 최저수온을 기록하였으며 8

월 또한 타 년도에 비해 최저수온이 낮았다. 1987년 7월 주변 연안에서 8°C 이하의 최저 수온을 기록하였다. 이 시기 주변연안 수온은 한겨울인 2월 누년 평균 수온보다 2도 낮은 수온이다(Suh et al., 2001). 1987년의 동해 전 연안의 최저수온은 다른 년도에 비해 낮았고 1988년부터 동해 전 연안의 수온이 급격히 상승하는 특이사항이 나타났다. 2013년 7월은 울기부터 주변연안까지 냉수대가 강하게 발달하였으며 이런 현상은 Choi(2015)와 Seo et al.(2017)에서 언급한 강하고 지속적인 하계 남풍계열의 바람에 의한 연안용승의 결과이다.

8월 동해 연안 표층의 평균수온 및 평년편차(1968~2017)를 Fig. 2 (B), (C)에 각각 나타내었다. 8월 평균수온의 시계열 분포는 울기~감포 주변해역에서 고위도의 연안역에 비해 평균수온이 낮게 나타났다. 이와 같은 현상은 8월 최저수온

Table 1 Distance Between the Thermal Front and the Eastern Coast of Korea (Longitude).

Depth	20 m				50 m			
	El Niño		La Niña		El Niño		La Niña	
Year	1987	1997	1988	1998	1987	1997	1988	1998
Donghae (N 37.5)	0.90	1.10	0.83	-	0.73	0.74	0.93	-
Jukbyeon (N 37)	0.73	0.73	0.39	-	0.66	1.10	0.24	-
Yeongduk (N 36.5)	0.78	1.12	0.28	-	0.47	1.13	0.29	-
Pohang (N 36)	0.50	0.40	0.19	-	0.41	0.59	0.14	-
Ulgi (N 35.5)	0.37	0.34	-	-	0.15	0.36	-	-

시계열분포와 저수온 발생 해역과 시기가 유사했다. 저수온의 현상은 1970년 후포연안, 1971년 죽변연안, 1972~1974년 울기 연안, 1987년 동해 전해역에서 나타났다. 특히 1995년의 저수온 분포는 울기~포항 연안에서 뚜렷하게 나타난다.

수온의 평년편차는 전 기간동안 고수온 저수온 시기가 번갈아 나타나고 있으나 1990년대 이전은 평균수온보다 낮은 푸른색 계열(-)로, 1990년대 이후는 평균수온보다 높은 붉은색 계열(+)이 우점한다. 이와 같은 결과를 볼 때 연안수온은 장기적으로 점차 상승하고 있으며, 이는 동해의 수온이 지구온난화에 의한 결과로 0.034°C/year의 수온상승률을 가진다는 Seong et al.(2010)의 연구를 뒷받침하는 결과이다.

최저수온분포도의 1987년 동해 전 연안역에 나타난 저수온 현상과 다음해인 1988년 수온이 급상승하는 현상은 평균수온 및 평년편차에서 더 뚜렷하게 나타난다. 수온의 평년편차 값을 보면 전 연안에서 1987년 (-)에서 1988년 (+)값으로 바뀐다. 특히 감포앞바다의 경우 편차가 7 증가하여 이상수온이 나타났다. 1997~1998년의 수온 변화는 1987~1988년에 비해 수온변화가 작지만 동해 전 연안에서 평년편차가 (-)값에서 (+)값으로 꺾는 시기이다.

3.3 El Niño와 La Niña가 연안용승 발생에 미치는 영향

동해연안에서 50년간(1967~2017) 8월 연안해역별 평균수온에 대한 편차와 동 기간의 ONI를 Fig. 2에 함께 나타내었다. El Niño(La Niña)의 기준은 ONI 편차가 +0.5 이상(-0.5 이하)으로 한다.

Fig. 2 (D)의 ONI의 51년간 연변동을 보면, 1987~1988년과 1997~1998년 두 차례의 큰 변동을 볼 수 있다. ONI는 1987년 1.7에서 1988년 -0.9로 2.6 감소하고, 1997년 2.0에서 1998년 -0.8로 2.8 감소하였다. 이와 같은 현상은 동해 전 연안의 수온 평년편차가 (-)에서 (+)값으로 상승하는 시기와 일치한다. 따라서 ONI의 급격한 변화는 동해 연안의 수온분포 구조에 영향을 줄 수 있다고 판단한다. ONI가 높은 1987년과 1997년 연안역 수온이 낮게 나타나는 결과는 El Niño 발생시기의 여름철 표층수온이 El Niño 발생 전 시기보다 낮아진다

는(Hong et al., 2001)의 연구와 유사한 결과를 보이고 있다.

전 연안역의 수온 평년편차가 전 해역에서 급상승하고 ONI가 2.5 이상 감소하는 시기(1987~1988년, 1997~1998년)의 8월 공간적인 수온 분포를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3의 20m, 50m 수심별 수평 수온분포도에서 수온이 급격하게 변하는 특징을 보이는 등수온구간을 각각 18~19°C, 12~13°C로 선정하여 빗금이 들어간 흰색으로 표시하였다. 또한 Fig. 3에서 지정한 등수온구간이 동일 위도선상 동해연안에서 떨어진 거리를 Table 1에 나타내었다.

El Niño시기인 1987년과 1997년의 경우 La Niña시기인 1988년과 1998년의 연안역의 수온이 외양에 비해 낮다. 특히 El Niño시기와 La Niña시기의 수온차가 남동쪽 연안에서 8°C 이상 차이가 난다. 등수온구간 분포를 보면 1987년 El Niño시기 등수온구간은 남쪽 끝까지 길게 뻗어 동해 연안에 비교적 낮은 수온의 해수가 존재한다. 한편 1988년 La Niña시기에는 N 37.5°(동해시) 남쪽부터 등수온구간이 연안으로 붙는 특성을 보이며 N 35.8°(감포) 이남으로 남하하지 않아 연안역 수온이 El Niño시기에 비해 높다. 10년 후인 1997년 El Niño시기 등수온구간은 1987년과 같이 남쪽으로 길게 뻗어 있으며 특히 50m 수심대의 12°C이하의 저수온역이 더 넓게 분포한다. 1998년 La Niña시기의 수온분포는 울기~감포 앞바다에 걸쳐 국지적으로 분포하며, El Niño시기처럼 남쪽 해역 끝까지 분포하는 형태는 볼 수 없었다. 또한 50m 수심대는 오히려 13°C 이상 높은 수온을 가지는 해수가 북쪽 연안을 따라 확장하는 형태를 볼 수 있다.

Fig. 3과 동일시기인 El Niño와 La Niña시기 동해 연안을 따라 북향하는 동한난류의 경로를 잘 파악하기 위하여 후포 이남에 위치한 정선 Line 103(영덕), Line 102(포항), 그리고 Line 209(감포)의 수온연직분포를 Fig. 4에 나타내었다.

수온연직분포는 El Niño시기와 La Niña시기 모든 정선에서 렌즈형태의 수온 분포를 나타냈다. Fig. 4에서 20°C 이상의 등수온선이 두껍게 분포한 곳이 동한난류의 중심으로 볼 수 있다. 수심이 증가할수록 수온이 급격하게 변화하는 수온약층의 수심이 깊어진다. 그리고 연안역 동일 수심층에서 연

엘니뇨와 라니냐가 한국 동해 연안용승에 미치는 영향

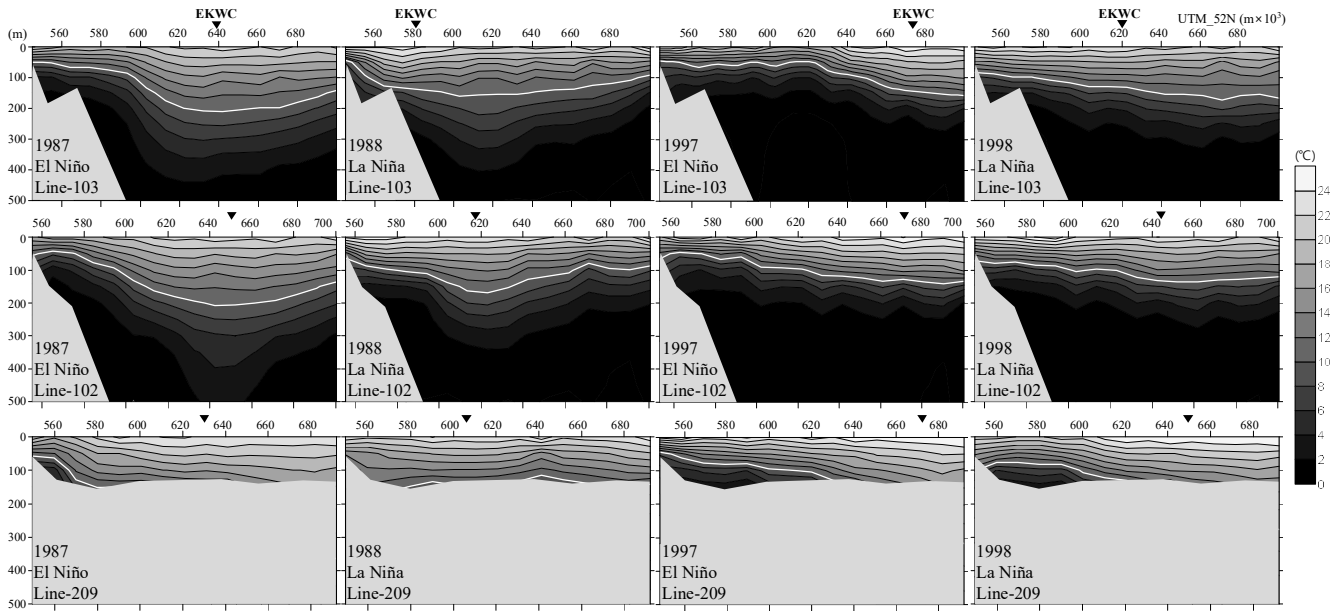


Fig. 4. Vertical distribution of water temperature at Line - 103 (upper), Line - 102 (middle) and Line - 209 (lower) in El Niño (1987, 1997) and La Niña (1988, 1998). ▼: Center of EKWC, Thick white line: Isotherm 10°C.

안에서 외양으로 갈수록 수온이 증가하여 나타는 경계층경사가 발달한다. 이와 같은 현상은 경계층경사로 인해 수온약층이 외양에 비해 연안에서 얇은수심에 형성된다는 Seung(1974)와 Lee and Na(1985)의 연구결과와 같다.

El Niño시기인 1987년과 1997년의 난류의 중심은 동해 연안에서 50 km 이상 떨어져 형성되고 있으며 La Niña시기인 1988년과 1998년은 연안에 근접한 곳에 형성한다. 난류의 중심이 연안에서 멀리 떨어진 해역에 형성되는 El Niño시기가 La Niña시기에 비해 경계층경사도가 크고 연안역의 수온이 낮게 나타난다. 따라서 수평수온분포의 결과와 마찬가지로 El Niño시기의 연안역 수온이 낮게 형성되는 것을 확인할 수 있다.

위의 결과로 El Niño와 La Niña시기의 성층형성수심과 경계층경사의 특징을 다음과 같이 요약할 수 있다. El Niño가 강한 년도는 하계 경계층경사가 크고 연안역 성층 형성수심이 얇아 연안의 수온이 낮게 분포한다. 또한 수온분포는 남풍계열의 바람이 지속적으로 불 경우 용승현상이 발생할 확률이 높은 수온구조이다. 반대로 La Niña시기는 경계층경사도가 작고 성층 형성수심이 El Niño시기에 비해 비교적 깊게 형성하기 때문에 이 시기에는 용승현상을 유발할 수 있는 충분한 바람이 불어도 용승현상이 발생할 확률은 낮아진다(Fig. 5). 용승발생에 큰 영향을 주는 경계층경사가 커지는 수온구조 특성은 쓰시마 난류의 강도와도 연관이 있다. 태평양 순년진동(Pacific Decadal Oscillation; PDO)과 동해 해면고도 변동과 상관성이 있으며, 이는 난류의 강도와 관계가 있다

(Gordon and Giulivi, 2004). 추후 ENSO 뿐 아니라 PDO와 동해 연안의 수온분포 및 해류의 강도 등 다양한 요소들을 통해 각 요소별 주기 특성과 함께 연구해 볼 필요가 있다.

Suh et al.(2001)의 연구결과에 따르면 1990년의 울기 연안에서 용승이 발생할 수 있는 바람 강도를 가진 남풍계열의 바람이 일정기간 불었음에도 불구하고 냉수대가 거의 출현하지 않았다. 이 시기의 10°C 등온선은 125 m 수심에 형성되었다. 따라서 용승을 발생시킬수 있는 바람(남서풍)을 충족하는 시기라도 성층 형성수심이 깊으면 용승이 발생하지 않을 수 있다. 이 결과는 본 연구에서 다른 La Niña(1988, 1998년) 시기의 수온구조 특성이 용승발생 확률이 낮아질 수 있다는 결과와 같다. 그러나 1990년의 ONI 는 +0.5로 El Niño 시작단계로 볼 수 있으나 1987-1988년 ONI 급감이후 서서히 증가하는 과정에 있으며 강한 La Niña의 영향이 약 2년간 지속되어 동해 연안역에 고수온이 유지되고 있는 것으로 판단된다. 1997-1998년 또한 ONI 급감이후 2001년까지 동해연안의 수온 평년편차가 양의 값으로 3년간 지속되어 나타나는 현상을 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 하계 한국 동해에서 발생하는 연안용승에 El Niño와 La Niña가 미치는 영향을 파악하기 위해 장기간(51년) 수집된 수온관측자료와 ONI를 이용하여 El Niño와 La Niña 시기 동해연안의 수온분포 특성을 분석하였다.

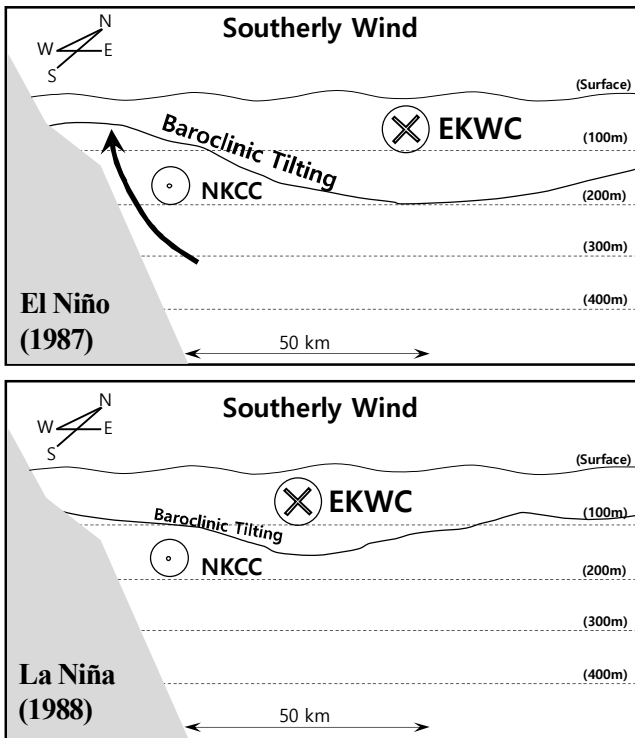


Fig. 5. Comparison of the Stratification of El Niño (1987) and La Niña (1988) periods at observation line - 102.

El Niño가 강한 시기 연안해역의 이상 수온은 음의 값으로 비교적 차가운 냉수괴가 넓게 분포한다. 이와 같은 현상은 수온 경계층경사가 커서 연안역의 수온 성층 형성 수심이 알아지기 때문이다. La Niña시기는 El Niño 시기와 반대로 이상 수온은 양의 값으로 수온이 높다. 그리고 수온의 경계층경사가 El Niño 시기에 비해 작아 수온 성층이 비교적 깊은 곳에 형성된다.

8월 ONI 가 2.5 이상 급감하는 연변동이 발생한 1987-1988년과 10년 후인 1997-1998년 동해 전 연안역의 수온이 4~7°C 급상승하였다. ONI가 각각 1.7, 2.0으로 El Niño가 강한 1987, 1997년과 ONI가 -1.0으로 La Niña가 강한 1988, 1998년 동해 연안역의 수온구조가 상이하게 나타났다.

ENSO 현상이 용승의 발생과 직접적인 연관이 있다고 단언할 수는 없으나 얇은 수심에 수온성층이 형성되는 현상은 El Niño 시기 하계 남풍계열의 바람에 의한 연안용승 발생 확률을 높일 수 있는 중요한 조건이다. 반대로 수온성층이 깊은 수심에 형성되는 현상은 La Niña 시기 용승발생에 도움을 주는 남풍계열의 바람이 지속적으로 불어도 용승 발생 확률을 떨어뜨릴 수 있다.

References

- [1] An, H. S.(1974), On the cold water mass around the southeast coast of Korean peninsula, J. Oceanol. Soc. Korea, 9, pp. 10-18.
- [2] Byun, S. K.(1989), Sea surface cold water near the southeastern coast of Korea: Wind effect, The journal of the oceanological society of Korea, 24(3), pp. 121-131.
- [3] Choi, Y. K.(2015), Upwelling in the southwest region of the East Sea in July, 2013, J Kor Soc Fish Technol, 51(2), pp. 212-220.
- [4] Gong, Y. and C. G. Park(1969), On the oceanographical character of the low temperature region in the eastern sea of Korea, Bull. Fish. Res. Dev. Agency, 4, pp. 69-91.
- [5] Gordon, A. L. and C. F. Giulivi(2004), Pacific decadal oscillation and sea level in the Japan/East sea. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 51, pp. 653-663.
- [6] Hahn, S. D., Y. S. Suh, and Y. H. Ahn(1995), Mapping cold water zone and warning service for aquaculture groups at the southeastern coast of Korean peninsula, In International Symposium on Remote Sensing, Vol. 11, pp. 67-74.
- [7] Hong, C. H., K. D. Cho, and H. J. Kim(2001), The relationship between ENSO events and sea surface temperature in the East (Japan) Sea, Progress in oceanography, 49(1-4), pp. 21-40.
- [8] Kim, D. S. and D. H. Kim(2008), Numerical simulation of upwelling appearance near the southeastern coast of Korea, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, 14(1), 1-7.
- [9] Kim, S. J., S. H. Woo, B. M. Kim, and S. D. Hur(2011), Trends in sea surface temperature (SST) change near the Korean peninsula for the past 130 years, Ocean and Polar Research, 33(3), pp. 281-290.
- [10] Kim, S. W., W. J. Go, S. S. Kim, H. D. Jeong, and K. Yamada(2010), Characteristics of ocean environment before and after coastal upwelling in the southeastern part of Korean Peninsula using an in-situ and multi-satellite data, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, 16(4), pp. 345-352.
- [11] Lee, C. R., C. Park, and C. H. Moon(2004), Appearance of cold water and distribution of zooplankton off Ulsan-Gampo area, eastern coastal area of Korea, Journal of the Korean Society of Oceanography, 9(2), pp. 51-63.

- [12] Lee, J. C.(1983), Variations of sea level and sea surface temperature associated with and wind-induced upwelling in the southeast coast of Korea in summer, *J. Korean Ocean. Soc.*, 18, pp. 149-160.
- [13] Lee, J. C.(2011), Upwelling-Response of the Cold Water off Haeundae in Summer, *The Sea*, 16(4), pp. 206-211.
- [14] Lee, J. C. and K. I. Chang(2014), Variability of the coastal current off Uljin in summer 2006, *Ocean and Polar Research*, 36(2), pp. 165-177.
- [15] Lee, J. C., D. H. Kim, and J. C. Kim(2003), Observations of coastal upwelling at Ulsan in summer 1997, *Ocean Science Journal*, 38(3), pp. 122-134.
- [16] Lee, J. C. and D. H. Kim(2018), Physical Environment Associated with Upwelling off the Southeast Coast of Korea. *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 51(5), pp. 579-589.
- [17] Lee, J. C. and J. Y. Na(1985), Structure of Upwelling off the Southeast Coast of Korea, *J. Oceanol. Soc. Korea*, 20(3), pp. 6-19.
- [18] Lee, K. B.(1978), Study on the coastal cold water near Ulsan, *J. Oceanol. Soc. Korea*, 13(2), pp. 5-10.
- [19] Lee, Y. H., J. Shim, Y. H. Choi, S. W. Kim, and J. M. Shim (2016), A Study on Cold Water Damage to Marine Culturing Farms at Guryongpo in the Southwestern Part of the East Sea, *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, 22(6), pp. 731-737.
- [20] Lim, D. B. and S. D. Chang(1969), On the cold water mass in the Korea Strait, *J. Oceanol. Soc. Korea*, 4(2), pp. 71-82.
- [21] Lim, D. B.(1973), The movement of the cold water in the Korea Strait, *J. Oceanol. Soc. Korea*, 8(1), pp. 46-52.
- [22] Korea Oceanographic Data Center NIFS(2019), 'Ocean Observation Data' (1967-2017), <http://www.nifs.go.kr/kodc/index.kodc/>.
- [23] National Weather Service NOAA(2019), 'Oceanic Nino Index' (1967-2017), <https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/>.
- [24] Nishida, K.(1926), Report of the oceanographic investigation. No. 1. Gover. Fish. Exp. Stat.
- [25] Seo, H. S., W. H. Lim, and D. S. Kim(2017), Numerical Experiments of Coastal Upwelling Occurred by Summer Winds in the East Sea of Korea, *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, 23(4), pp. 347-353.
- [26] Seong, K. T., J. D. Hwang, I. S. Han, W. J. Go, Y. S. Suh, and J. Y. Lee(2010), Characteristic for long-term trends of temperature in the Korean waters, *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, 16(4), pp. 353-360.
- [27] Seung, Y. H.(1974), A Dynamic Consideration on the Temperature Distribution in the East Coast of Korea in August, *J. Oceanol. Soc. Korea*, 9(2), pp. 52-58.
- [28] Seung, Y. H.(1984), A numerical experiment of the effect of coastline geometry on the upwelling along the east coast of Korea, *J. Oceanol. Soc. Korea*, 19(1), pp. 24-30.
- [29] Shimomura, T.(1957), The oceanographical conditions of the Japan Sea and its water systems, laying stress on the summer of 1955. *Bull. Japan Sea Reg. Fish. Res. Lab.*, 6, pp. 23-97.
- [30] Suh, Y. S., L. H. Jang, and J. D. Hwang(2001), Temporal and spatial variations of the cold waters occurring in the eastern coast of the Korean Peninsula in summer season. *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 34(5), pp. 435-444.
- [31] Tanioka, K.(1968), On the east Korean warm current (Tosen warm current), *Oceanogr. Mag.*, 20(1), pp. 31-38.
- [32] Yang, H. S., S. J. Oh, H. P. Lee, C. H. Moon, M. S. Han, and B. K. Kim(1998), Distribution of particulate organic matter in the Gampo upwelling area of the southwestern East Sea. *Ocean Science Journal*, 33(4), pp. 157-167.
- [33] Yoo, S. and H. C. Kim(2004), Suppression and enhancement of the spring bloom in the southwestern East Sea/Japan Sea. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 51(10-11), pp. 1093-1111.
- [34] Yoo, S. and J. Park(2009), Why is the southwest the most productive region of the East Sea/Sea of Japan?, *Journal of Marine Systems*, 78(2), pp. 301-315.

Received : 2020. 01. 10.

Revised : 2020. 02. 21.

Accepted : 2020. 02. 25.