

대마난류의 유동 특성과 PDO의 관계 분석

서호산* · 정용현** · 김동선***†

* 부경대학교 해양산업개발연구소 연구원, ** 부경대학교 생태공학전공 교수, *** 부경대학교 빅데이터융합전공 교수

Analysis of the Relationship between the Flow Characteristics of the Tsushima Warm Current and Pacific Decadal Oscillation

Ho-San Seo* · Yong-Hyun Chung** · 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

*** Professor, Major of Big Data Convergence, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

요 약 : 본 연구에서는 대마난류(Tsushima Warm Current, TWC)의 유동 변화에 영향을 주는 요소를 파악하기 위하여 TWC의 수송량과 태평양 순년진동(Pacific Decadal Oscillation, PDO) 및 엘니뇨 남방진동(El Niño - Southern Oscillation, ENSO)의 상호 관계 분석을 실시하였다. 25년(1993~2018년) 동안의 TWC의 월별 수송량을 계산해보면 하계에 가장 크고 동계에 가장 작게 나타나는 계절변동 주기가 뚜렷하다. TWC 수송량과 PDO 및 ENSO의 한 척도인 Oceanic Niño Index(ONI) 각각의 주기성 파악을 위한 power spectrum 분석결과, TWC 수송량은 1년 주기에서 peak를 보이지만 PDO 및 ONI는 뚜렷한 주기가 나타나지 않았다. 또한, TWC 수송량과 PDO 및 ONI의 상호 관계 파악을 위해 coherence 추정 방법을 이용하여 분석하였다. PDO 및 ONI의 coherence는 3년 이상의 장주기 변동에서 상호 기여도가 높으나 1년 이내의 단주기 변동에서는 상호 기여도가 낮다. 그러나 TWC 수송량과 PDO 두 요소 간 0.8~1.2년 주기에서 coherence 값은 0.7로 상호 기여도가 높다. 한편 서수도를 통과하는 TWC 수송량과 PDO는 I 기간(1993~2002년)과 III 기간(2010~2018년)에 역상관 관계성을 가진다. TWC 최대 수송량 (2.2 Sv 이상)이 높게 나타나는 시기에 PDO 지수가 -1.0 이하의 음의 값, 2.2 Sv 이하로 작은 시기에 PDO 지수가 양의 값을 나타낸다. 따라서 장기적인 PDO 지수 자료를 이용하면 TWC 수송량 변동 및 동해 연안역의 수온변화를 예측 또한 가능할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 수온, 대마난류, 엘니뇨남방진동, 태평양순년진동, 스펙트럼분석

Abstract : In this study, to understand the factors influencing the flow change the Tsushima Warm Current (TWC), the correlation between the volume transport the TWC, El Niño Southern Oscillation (ENSO), and Pacific Decadal Oscillation (PDO) was analyzed. A calculation of the monthly volume transport of TWC for 25 years (1993–2018) revealed that the seasonal fluctuation cycle was the largest in summer and smallest in winter. Power spectrum analysis to determine the periodicity of the TWC volume transport, Oceanic Niño Index (ONI), and PDO indicated that the TWC volume transport peaked at a one year cycle, but ONI and PDO showed no clear cycle. Further, to understand the correlation between the TWC transport volume and ONI and PDO, the coherence estimation method was used for analysis. The coherence of ONI and PDO had a high mutual contribution in long-period fluctuations of three years or more but had low mutual contribution in short-period fluctuations within one year. However, the coherence value between the two factors of the TWC volume transport and PDO was 0.7 in the 0.8–1.2 year cycle, which had a high mutual contribution. Meanwhile, the TWC volume transport and PDO have an inverse correlation between period I (1993–2002) and period III (2010–2018). When the TWC maximum transport volume (2.2 Sv or more) was high, the PDO index showed a negative value below -1.0, and the PDO index showed a positive value when the TWC maximum transport volume was (below 2.2 Sv). Therefore, using long-term PDO index data, changes in the TWC transport volume and water temperature in the East Sea coastal area could be predicted.

Key Words : Water temperature, Tushima Warm Current (TWC), El Niño Southern Oscillation (ENSO), Pacific Decadal Oscillation (PDO), Spectrum analysis

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

† Corresponding Author : kimds@pknu.ac.kr, 051-629-4611

1. 서론

기후변화로 인한 지구온난화는 전 지구적으로 악영향을 줄 것으로 판단된다(Cho and Maeng, 2007). 지구온난화로 인한 수온 상승이나 해면고도 상승 또한 장기적으로 큰 영향을 미칠 것으로 예상되는 부분이다. 한국 연안의 수온은 지속적으로 상승하고 있으며, 서해와 남해 그리고 동해의 연안 수온은 해마다 0.03℃ 이상 상승하고 있다. 특히 동해 연안 수온의 경우 1968년부터 2008년까지 50년간 1.7℃ 상승을 기록하여 서해와 남해 연안에 비해 수온 상승률이 가장 높게 나타난다(Seung et al., 2010).

동해로 유입되는 주 해수 유입원은 쿠로시오난류(Kuroshio Current, KC)의 지류인 대마난류(Tsushima Warm Current, TWC)로 대한해협을 통해 북동향하여 한국 동해안으로 유입된다. 한국 동해남부 연안의 해저지형은 200m 수심의 대륙붕 이후 수심이 급격히 깊어지는 특성을 보이는데 유입된 대마난류는 동해안의 대륙붕단을 따라 동해 연안과 평행한 방향으로 북향하는 동한난류(East Korea Warm Current, EKWC)를 형성한다. 그리고 북쪽에서 동해연안을 따라 남향하는 북한난류(North Korea Cold Current, NKCC)가 존재하며 이 두 난류와 한류는 북위 37~41°에서 만나 사행하는 형태의 극전선을 형성한다. 이와 같이 한국 동해 연안해역은 지형특성, EKWC와 NKCC의 상호작용과 기상(바람·태풍 등) 등의 환경요소에 의해 냉수대 형성 및 연안용승 발생 등 복잡한 수온 환경 변화가 발생한다(Fig. 1).

장주기 변동을 가지는 엘니뇨-남방진동(El Niño - Southern Oscillation, ENSO)과 태평양순년진동(Pacific Decadal Oscillation, PDO)또한 동해의 수온 변화에 영향을 미친다. ENSO는 열대태평양지역(저위도)의 수온을 그리고 PDO는 북태평양 중위도해역의 수온 변동성을 기준으로 기후변화에 어떤 영향을 미치는지 그 지수로 파악할 수 있다.

태평양 적도 해역에서 발생하는 ENSO는 중위도지방까지 영향을 미치며 한반도 주변 환경 및 기후 변화에도 큰 영향을 미치고 있다. Yoo and Kim(2004)는 ENSO 현상이 한국 동해 남부 해역의 spring bloom과 관련이 있을 수 있다고 하였다. 또한 Hong et al.(2001)은 동해의 표층 수온은 ENSO와 관련이 있으며 El Niño 발생 시기의 여름철 표층 수온은 El Niño가 발생하기 전년도 보다 낮아지고, 겨울에는 반대로 El Niño가 발생하기 전년도보다 높아진다고 하였다. Kim et al.(2011) 또한 ENSO의 장주기 변동은 수온의 변동과 반대의 경향성을 보이거나 봄철과 겨울철에 한반도 주변 수온이 상승하는 경향이 나타난다고 하였다.

PDO지수는 동중국해를 통하여 북동쪽으로 수송되는 KC와 밀접한 관련이 있다. KC가 진행하는 경로의 위성 해면

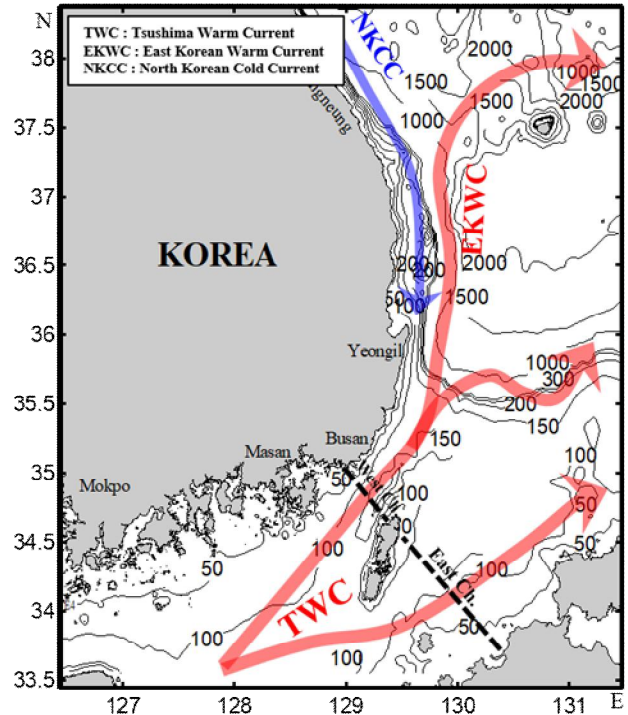


Fig. 1. Bottom topography and type of currents in East Sea of Korea.

고도 자료와 PDO지수의 상관 관계는 0.76으로 높게 나타난다(Andres et al., 2009). 이처럼 KC의 지류인 TWC는 대한해협을 통해 한국 동해로 유입되는 유일한 난류수이며 동해 연안의 해양환경 변화에 지대한 영향을 미치는 요소이다.

해류의 유동 변화를 일으키는 요소는 다양하며 장기적인 자료를 통하여 분석해야 한다. 그러나 지금까지 TWC의 수송량 및 수괴 특성에 대한 연구는 비교적 짧은 조사 기간 동안의 수송량을 산정에 대한 연구에 국한되어 있다. 따라서 본 연구에서는 26년간(1993~2018)의 장기간의 자료들을 이용하여 TWC의 유동 변화와 PDO의 상호 관계성을 파악하고자 한다.

2. 자료 및 방법

2.1 TWC & PDO, ONI 자료

대한해협을 통과하는 TWC의 수송량을 계산하기 위하여 CMEMS(Copernicus Marine Environment Monitoring Service) 글로벌 예측 시스템을 기반으로한 재분석자료 GLORYS12V1를 이용하였다. 이 모델은 해수면변동에 따라 위성 해수면 온도, 현장 관측 수온 및 염분 연직 자료들이 함께 동화하여 구동된다. 이 모델에서는 표층에서 저층까지의 수온, 염분, 해류, 해면고도, 혼합층 깊이 등의 자료를 출력할 수 있다. 여기에

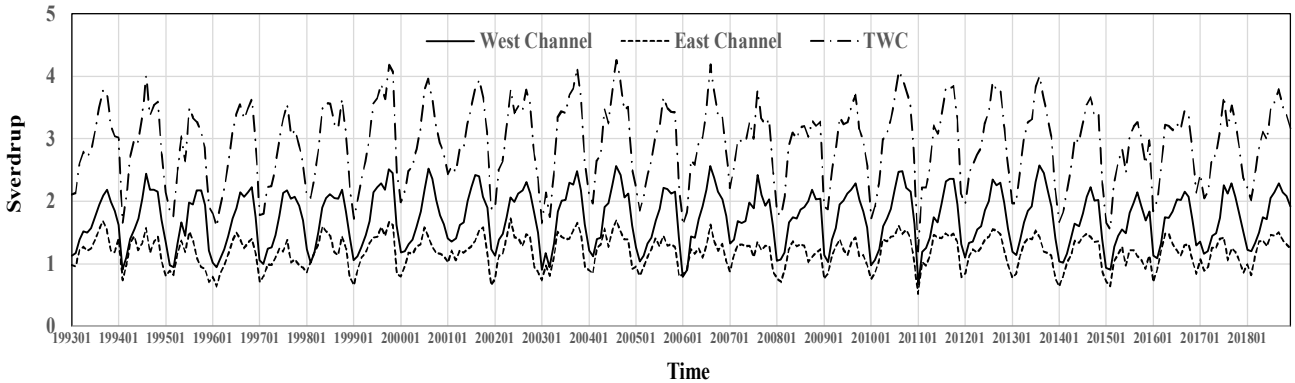


Fig. 2. Time series of TWC volume transport (West Channel (solid line), East channel (dashed line) and total TWC (Dash-single dotted line)) from 1993 to 2018.

서 대한해협을 월 평균 해류 유속자료를 이용하였다. 수집 자료는 26년간(1993~2018)의 기간을 대상으로 하였으며 해상도는 1/12°(약 8 km)이다.

TWC의 수송량을 계산하기 위하여 수집된 유속자료를 통해 $10^6 \times 1 \text{ m}^3/\text{s}$ 유량을 의미하는 스베드립(Sv : Sverdrup) 단위로 계산하였다. 계산된 TWC의 수송량을 시계열자료는 동일 관측 시기의 선행 연구 결과와 비교 검증을 실시 하였다.

TWC와의 관계 분석을 위하여 한국 동해 연안 환경 변화와 관련성을 있는 장주기 변동성을 가지는 ENSO 및 PDO의 지수 자료를 수집하였다. NOAA Climate Prediction Center에서 ENSO의 한 척도인 Oceanic Niño Index(ONI)를 제공하고 있다. 그리고 Tokyo Climate Center WMO에서 Pacific Decadal Oscillation (PDO) 지수를 제공한다. 수집된 자료의 총 기간은 26년간 (1993~2018)의 자료이고 비교 대상인 TWC 수송량 자료와 시간 간격은 월 단위로 동일하다.

2.2 스펙트럼 분석

대마난류(TWC) 유량 변동과 PDO 및 ENSO의 주기성 간의 상호관계를 파악하기 위해 스펙트럼 분석을 실시하였다.

일반적으로 해양의 시계열자료는 눈으로 보아 주기성을 찾기가 어렵기 때문에 시간 영역이 아닌 주파수 영역에서 분석하면 수온의 주기와 변화 요인을 쉽게 파악할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 수온 변화를 일으키는 요인을 알아보기 위하여 FFT(Fast Fourier Transform)을 이용한 power spectrum과 coherence 추정 방법을 사용하였다.

이 방법은 Fourier 변환을 통해 나타난 주파수 영역은 시계열이 가진 주기와 크기에 대한 spectrum분석을 용이하게 해준다(Vinay and John 1999). 어떠한 시각의 관측치 X_n 과 시간간격 $\tau(=n\Delta t)$ 만큼 떨어진 관측치 $X_{n+\tau}$ 사이의 관계가 어느 정도 있는지를 알기 위하여 자기상관함수를 계산한다(Cho et al., 2005).

$$R_X(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N-\tau} X_n X_{n+\tau} \quad (1)$$

여기서 $R_x(\tau)$ 는 우함수이고, $\tau=0$ 에서 최대치를 갖는다. 자기상관 함수를 Fourier 변환하여 주파수 영역으로 나타낸 것을 power spectrum 밀도함수 $S_X(f)$ 라 한다.

$$S_X(f) = 2 \sum_{t=\Delta t}^{M\Delta t} R_X(\tau) e^{-i\omega\tau} = 4 \sum_{t=\Delta t}^{M\Delta t} R_X(\tau) \cos(2\pi f\tau) \quad (2)$$

여기서 M 은 최대 자료 수, Δt 는 자료 샘플 간격, $f=1/T$, T 는 주기이다.

Coherence 함수(Emery and Thomson, 1998)는 주파수 영역에서 두 변수 간의 상관계수를 나타내는 함수로, Fourier 변환을 통해 구할 수 있으며 다음 식(3)과 같다.

$$Coh_{XY}(f) = \frac{|S_{XY}(f)|}{\sqrt{S_X(f)S_Y(f)}} \quad (3)$$

여기서 $S_X(f)$, $S_Y(f)$ 는 x 와 y 지점에 대한 power spectrum 밀도이며, $S_{XY}(f)$ 는 cross spectrum 밀도이다. Cross spectrum 밀도는 시간영역의 두 변수 x , y 의 상호상관함수를 Fourier 변환하여 주파수 영역으로 변환한 것이며, 계산방법은 power spectrum 밀도와 동일하다.

3. 결과 및 고찰

3.1 TWC 수송량

TWC 수송량과 PDO 및 ONI의 상호관계분석을 위하여 TWC 수송량을 계산하였다. 대한해협 가운데 위치한 대마도

대마난류의 유동 특성과 PDO의 관계 분석

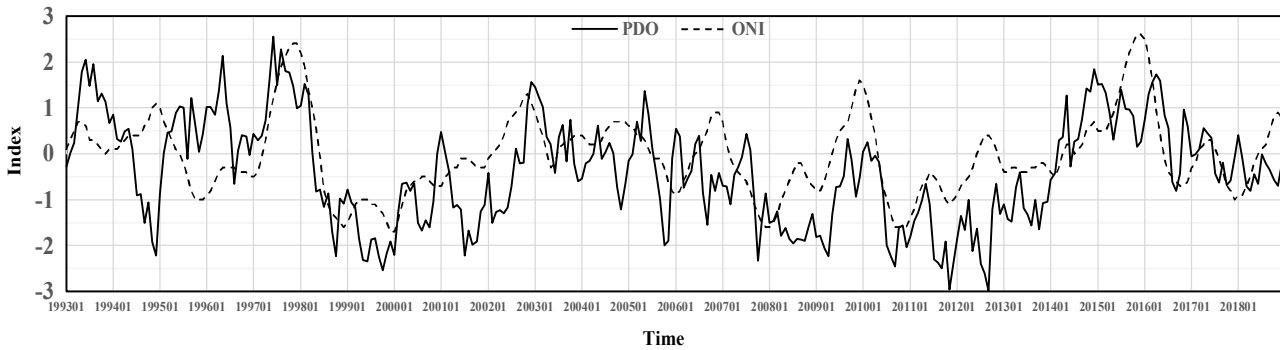


Fig. 3. Time series of PDO (solid line) and ONI (dashed line) from 1993 to 2018.

를 기준으로 서수도(부산-대마도)와 동수도(대마도-후쿠오카) 각각의 난류 수송량을 계산하여 Fig. 2에 시계열로 도시하였으며 월 평균 수송량을 Table 1에 값으로 나타내었다.

대한해협 서수도를 지나는 TWC의 월 평균 수송량은 겨울철 2월에 1.11 Sv로 가장 작고 여름철 8월에 2.24 Sv로 가장 크다. 대한해협 동수도를 지나는 TWC의 월 평균 수송량은 겨울철 1월에 0.83 Sv로 가장 작고 여름철 8월에 1.41 Sv로 가장 크다. 서수와 동수를 합산한 TWC 전체 수송량은 겨울철 1월에 1.97 Sv로 가장 작고 여름철 8월에 3.65 Sv로 가장 크게 타나난다. 따라서 대한해협을 통과하는 TWC의 수송량은 하계 8월에 가장 크고 동계 1월에 가장 적게 나타나 1년 주기의 계절변동이 뚜렷하게 나타난다.

서수도를 지나는 TWC 수송량은 동수도를 지나는 TWC 수송량에 비해 약 1.45배 높다. 서수도를 지나는 TWC는 한

국 동해 연안을 따라 북상하며 EKWC의 주류를 형성하므로 한국 연안 해양환경 변화에 영향을 미치는 주요인이 된다.

도플러 유속계 ADCP를 TRBM(Trawl-Resistant Bottom Mount) 방식으로 해저면에 저층 계류하여 층별 유속을 측정을 통해 TWC 수송량을 계산한 Teague et al.(2002) 연구에 의하면 1999년 5월부터 2000년 3월까지의 대한해협을 지나는 TWC의 월 평균 수송량은 2.7 Sv으로 본 연구에서 사용된 CMEMS 자료로 계산한 동일 시기 월 평균 수송량 3.1 Sv에 비해 13% 작게 나타났다. 또한 부산-후쿠오카 페리에 부착한 도플러 유속계 ADCP를 이용하여 1997년 2월부터 2007년 2월까지 10년간의 TWC 수송량을 계산한 Fukudome et al.(2010)의 연구 결과에 의하면 대한해협의 서수와 동수에서 TWC 수송량은 각각 1.45 Sv, 1.20 Sv로 나타났다. CMEMS 자료로 계산한 동일 시기의 대한해협 서수와 동수의 월 평균 TWC 수송량은 각각 1.65 Sv, 1.21 Sv로 서수와 동수의 수송량 오차는 각각 11%, 0.8%로 나타났다. 관측 방법에서 나타나는 차이 그리고 실측치와 모델을 통해 계산된 차이가 있기 때문에 이를 고려하면 CMEMS 자료와 선행 연구 결과에서 계산된 TWC 수송량의 오차는 크지 않은 것으로 판단된다.

본 연구에서는 대한해협의 단면적에 대한 TWC 수송총량을 계산하였기 때문에 TWC가 북동향하여 유입된다고 정의하였으나 수심별로 다르게 분석해 보면 해저면에서 남서쪽으로 향하는 역류가 나타나기도 한다(Takikawa et al., 2005). 이 역류 또한 계절 변동이 강하게 나타나기 때문에 앞으로의 추가적인 연구에서 다룰 필요가 있다.

Table 1. Average monthly TWC volume transport (West Channel, East channel and total TWC) from 1993-2018

TWC(Sv)	West Cha.	East Cha.	West+East	West/East(%)
Average	1.73	1.19	2.92	145
Jan.	1.13	0.83	1.97	136
Feb.	1.11	0.90	2.01	123
Mar.	1.27	1.07	2.35	119
Apr.	1.48	1.23	2.71	120
May.	1.69	1.35	3.04	125
Jun.	1.82	1.31	3.13	139
Jul.	2.05	1.37	3.42	150
Aug.	2.24	1.41	3.65	159
Sep.	2.24	1.33	3.57	168
Oct.	2.15	1.33	3.48	162
Nov.	1.99	1.23	3.22	162
Dec.	1.58	0.95	2.53	166

3.2 PDO & ONI

TWC 수송량과의 상호관계분석을 위해 수집한 PDO와 ONI 자료를(1993~2018년) Fig. 3에 시계열로 나타내었다. 동-중부 열대 태평양의 3개월 평균 해수면 온도의 변화를 추적하는 ONI는 2~7년의 불규칙적인 간격으로 El Niño (ONI > +0.5)와 La Niña (ONI < -0.5) 사이에서 변동하여 나타난다. PDO는 10년 이내 주기로 불규칙적으로 변화하는 태평양 중

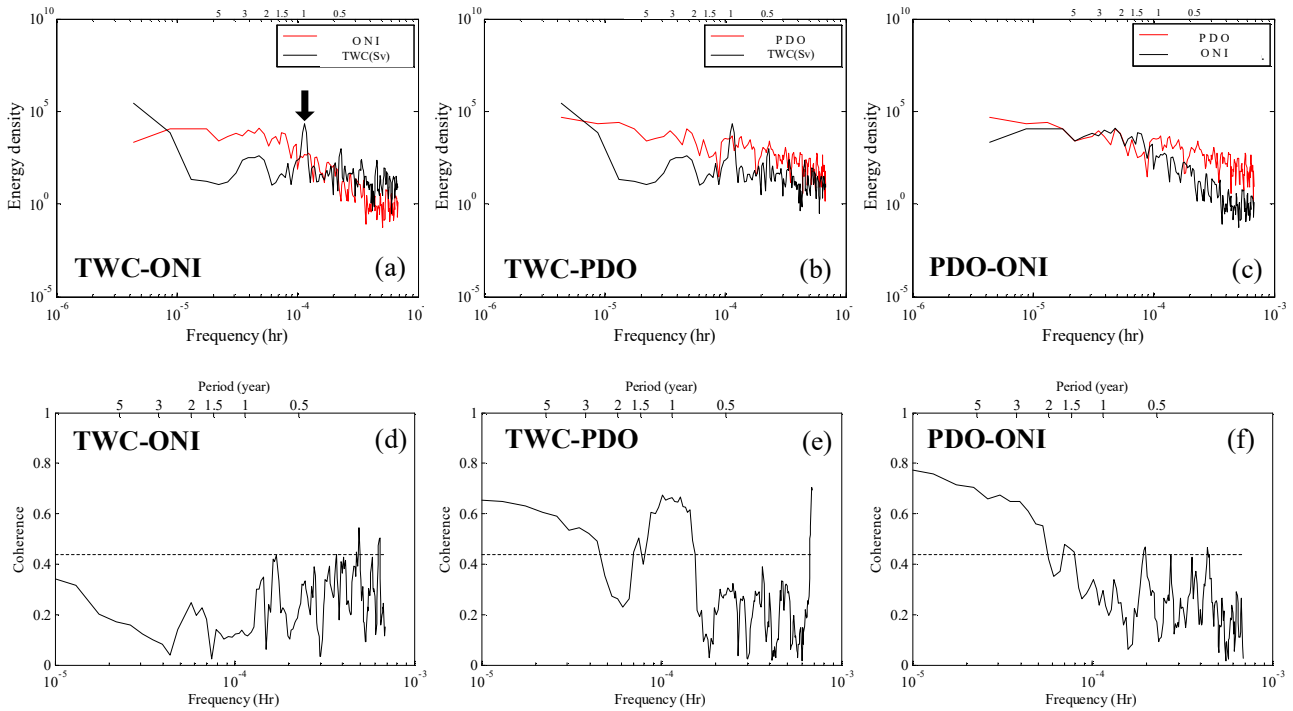


Fig. 4. Power spectrum of TWC, ONI and PDO (TWC-ONI (a), TWC-PDO (b) and PDO-ONI (c)). Coherence between TWC, ONI and PDO (TWC-ONI (d), TWC-PDO (e) and PDO-ONI (f)).

부 수온변동의 지표이다. 2000년부터 2010년까지의 상승과 하강하는 추세 그리고 2011년 뒤로 상승 및 하강을 나타내는 PDO의 10년 간격 장주기 변동을 볼 수 있으나 전반적인 변동이나 계절 변동과 같은 명확한 주기성은 찾을 수 없다.

PDO와 ONI값을 시계열로 비교해보면 1997년을 기준으로 이전에는 ONI가 상승할 때 PDO가 하강, ONI가 하강할 때 PDO가 상승하는 반비례하는 변동이 나타나고 1997년 이후부터는 3년 이상의 장주기 변동 유사한 경향성을 보인다. 즉 ONI와 PDO의 1년 이내 단주기 성분에서는 불일치한다.

ONI(Oceanic Niño Index)는 ENSO를 나타내는 지수로, ENSO와 PDO는 각각 저위도와 북태평양의 기후와 관련 있지만 서로에게 영향을 줄 수 있으며 그 영향은 최대 30년까지 지속된다(Mantua, 2001). ENSO와 PDO는 물리적으로 기후 패턴이 서로 상호작용을 하며 ENSO가 PDO 사이클을 이끄는 경향이 있다는(Gershunov and Barnett, 1998) 연구 결과도 있다. 그러나 대부분의 연구결과에 따르면 ENSO와 PDO는 관련성이 적거나 모순이 많다.

3.3 TWC수송량과 PDO 및 ONI 관계 분석

1993-2018년의 TWC 수송량과 ONI, PDO의 상호 관계성을 파악하기 위해 스펙트럼 분석 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4 상단의 (a)~(c)는 가장 뚜렷하게 나타나는 주기를 파

악하기 위한 power spectrum, Fig. 4 하단의 (d)~(f)는 두 요소 간의 상호 기여도를 알아보기 위한 coherence 분석 결과이다.

TWC 수송량의 power spectrum 분석 결과에서는 1년 주기에서 Peak가 뚜렷하게 나타난다(Fig. 4 (a)). TWC 수송량의 경우 3.2 대마난류 수송량에서 기술한 바와 같이 겨울철에 가장 높고 여름철에 가장 낮게 나타나는 수송량 계절변동 특성이 반영된 결과이다. PDO와 ONI의 power spectrum 분석 결과 두 항목 모두 뚜렷한 Peak가 나타나지 않고 3년 이상 장주기에서의 상호 간 기여도가 높은 것으로 나타난다(Fig. 4 (c)). 장주기 분석을 위해서는 더 장기적인 자료를 통한 비교 분석을 할 필요가 있다.

TWC 수송량과 ONI의 coherence 분석결과에서 ONI와 TWC의 상호 간 기여도가 높은 주기는 나타나지 않는다(Fig. 4 (d)). TWC 수송량과 PDO의 coherence 분석 결과를 보면 0.8-1.2년 주기에서 coherence 값은 0.7로 상호 기여도가 높게 나타나고 5년 이상 장주기에서도 기여도가 비교적 높은 결과를 보인다(Fig. 4 (e)). Andres et al.(2009)는 KC가 진행하는 경로의 위성 해면 고도 자료와 PDO 지수의 상관관계는 0.76으로 높게 나타난다는 것과 상호 관계성에서 유사하다고 볼 수 있다 하였다. 또한 TWC는 KC(Kuroshio Current)의 지류로 KC의 변동과 관련성이 크다. 따라서 TWC 수송량과 PDO의 단주기 변동이 상호 관계성이 높은 것으로 판단된다.

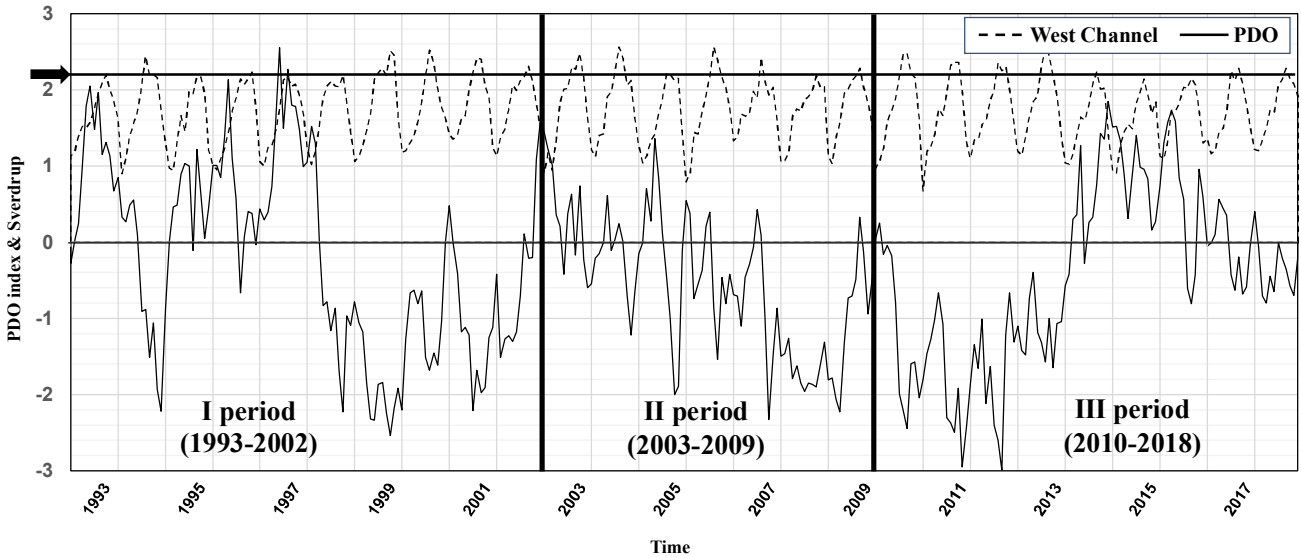


Fig. 5. Time series of West Channel (TWC) volume transport (West Channel (dashed line) and PDO (solid line) from 1993 to 2018.

3.4 TWC 수송량과 PDO의 상호관계

TWC 수송량과 PDO 상호관계성을 보기 위해 두 성분의 시계열을 나타내었다(Fig. 5). TWC 서수도 수송량을 검정색 점선으로 표시하였고, 검정색 실선은 PDO 지수이다. 또한 26년간(1993~2018)의 기간을 I, II, III 세 구간으로 나누었다. 2000년 이전에는 PDO지수와 KC의 상관성이 높지만 이후에는 연관성이 낮아진다는 Wu et al.(2019)의 결과를 참고하였다. PDO 지수가 양의 값이 지속 될 때 TWC 서수도 수송량이 감소하고 PDO 지수가 음의 값이 지속 될 때 TWC 서수도 수송량이 증가하는 형태가 비교적 잘 나타나는 1993~2002년과 2010~2018년 구간을 각각 I, III 구간으로 한다. 그리고 위의 형태가 잘 나타나지 않는 2003년부터 2009년까지를 II 구간으로 한다.

I 구간과 III 구간의 기간 동안 하계 8월 TWC 서수도 최대 수송량이 2.2 Sv 이상으로 높게 나타나는 시기에 PDO 지수가 -1.0 이하 값으로 나타나는 경향을 보이고, 2.2 Sv 이하로 작은 시기에 PDO 지수가 -1 이상의 값을 가지는 경향을 보이며 두 요소 간 음의 상관관계를 나타낸다. 반면 II 구간의 경우 TWC 서수도 수송량과 PDO 지수간 관계성은 잘 나타나지 않는다.

좀 더 명확히 판단하기 위해 I 구간과 III 구간에서의 연평균 TWC 수송량이 가장 크고 적게 나타나는 해의 TWC 수송량과 PDO의 월별 분포를 Fig. 6 (a), (b)에 나타내었다. 또한 I 구간과 III 구간의 모든 년도를 대상으로 8월 TWC 서수도 최대 수송량과 PDO 지수의 분산형 차트를 Fig. 6 (c)에 나타내었다. I 구간에서 연 평균 TWC 수송량이 1.75 Sv로 가장 크게 나타나는 2000년의 경우 PDO 지수는 8월을 제외한 모

든 월에서 양의 값을 보이지만, 연 평균 TWC 수송량이 1.63 Sv로 가장 작게 나타나는 1996년의 PDO 지수는 모두 0이하인 음의 값을 가진다(Fig. 6. (a)). 그리고 III구간에서 또한 연평균 TWC 수송량이 1.83 Sv로 가장 크게 나타나는 2013년의 경우 PDO 지수는 모든 월에서 양의 값을 보이지만, 연 평균 TWC 수송량이 1.58 Sv로 가장 작게 나타나는 2015년의 PDO 지수는 모든 월에서 음의 값을 보이며 PDO 지수 0을 기준으로 대칭되는 형태로 나타난다(Fig. 6. (b)). Fig. 6 (c)에서 TWC 서수도 하계 수송량을 나타내는 세로축의 2.2 Sv와 PDO 지수를 나타내는 가로축의 -1 을 기준으로 나누어보면, TWC 수송량이 2.2 Sv 이상이고 PDO 지수가 -1 이하인 구간과 TWC 수송량이 2.2 Sv 이하이고 PDO 지수가 -1 이상 구간으로 분리되어 분포한다. 두 요소의 선형 추세선의 TWC 수송량을 나타내는 축의 절편은 2.15 Sv로 2.2 Sv와 유사하다. 이와 같이 TWC 수송량과 PDO 지수는 2.2 Sv와 -1을 기준으로 역의 상관관계가 나타난다.

Gordon and Giulivi(2004)에 의하면 PDO와 KC강도는 양의 상관관계로 PDO가 양의 값을 가질 때 KC강도가 강해지고 반대로 PDO가 음의 값을 가질 때 KC강도는 약해진다. 이 결과와 함께 KC의 강도가 강한 시기 북태평양의 KC의 주 흐름이 지나는 해역의 해면 고도가 높을 때 KC의 지류인 TWC가 유입되는 동해의 해면 고도가 낮아지고 반대로 KC의 강도가 약해지면 동해의 해면 고도가 높아지는 결과가 나타난다. 이와같이 KC와 TWC의 수송량 사이에 역의 관계가 있을 수 있다는 가능성을 제시하였다. 이 선행 연구결과는 본 연구의 I 구간과 III 구간에서 TWC 수송량과 PDO 두 요소 간 나타나는 역상관관계를 충분히 뒷받침할 수 있는 내용이다.

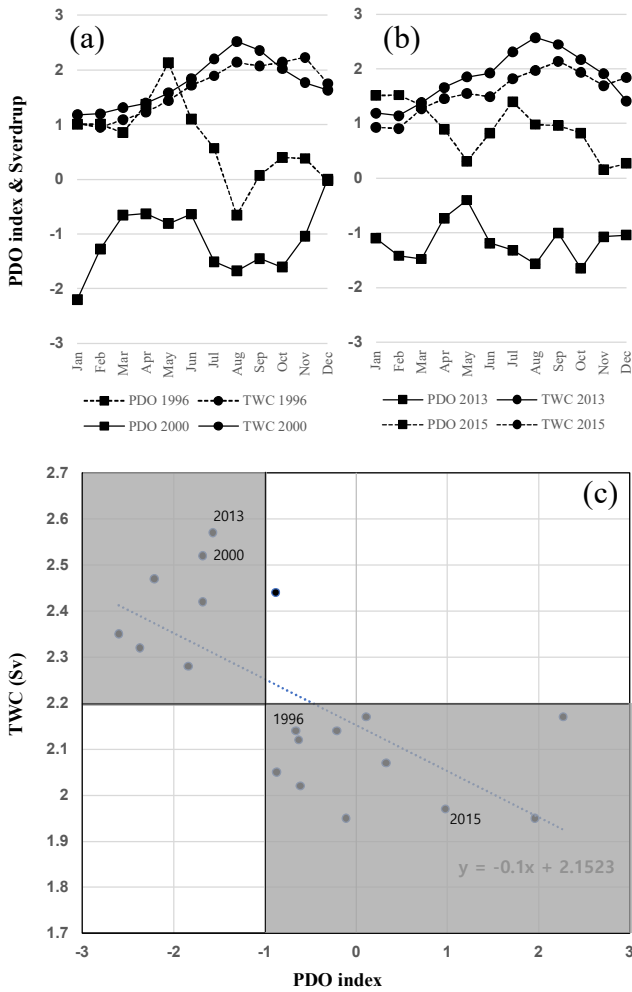


Fig. 6. Monthly time series of TWC volume transport and PDO index for 1996, 2000 (a) and 2013, 2015 (b). Scatter chart of relationship between TWC volume transport and PDO index (c).

TWC의 주 흐름인 KC와 PDO의 연관성이 시간이 갈수록 약해지고 있다는 연구 결과가 있으며, 2000년 이전의 경우 PDO와 KC의 상관성이 높게 나타났지만 2000년 이후 2012년까지의 자료를 통해 북태평양 바람 구역변동이 심해져 연관성이 낮아졌다고 하였다(Wu et al., 2019). 하지만 본 연구에서는 2009년 이후 III 구간에서 TWC와 PDO의 연관성이 높게 나타난 것으로 보아 PDO와 KC의 상관성에 대해서도 추가적 연구를 진행해 볼 필요가 있다.

4. 결론

본 연구에서는 TWC의 유동 특성이 PDO 및 ENSO와 같은 장주기 환경변화와 어떤 관계적 특성을 가지고 있는지 분석

하기 위하여 약 26년간(1993~2018)의 기간을 대상으로 시계열 분석을 실시하였다.

PDO와 ONI는 시계열에서 장주기 변동 유사한 경향성을 보이지만 1년 이내의 주기 변화에서는 거의 경향성이 나타나지 않았다. TWC 수송량과 PDO 및 ONI의 상호 관계성을 스펙트럼 분석을 통해 파악해본 결과 TWC와 PDO 수송량 두 요소 간 0.8-1.2년 주기에서 coherence 값은 0.7로 상호 기여도가 높다. 또한 한국 연안 해양환경 변화에 영향을 미치는 TWC 서수도 수송량과 PDO 시계열자료를 분석해본 결과 1993~2002년과 2010~2018년의 기간 동안 TWC 서수도 여름철 최대 수송량이 2.2 Sv 기준 이상으로 나타나면 PDO 지수가 -1.0 이하 값으로 나타나고, 이하로 나타날 경우 PDO 지수가 양의 값을 가지는 역상관관계가 나타남을 확인하였다. 반면 2003~2009년의 경우 그 관계성이 다소 떨어진다.

한국 동해로 유입되는 TWC는 연안 해양환경 변화에 영향을 미치는 주요인이며 이와 관련된 다양한 선행 연구 결과들이 있다. Lee and Chang(2014) 및 Lee and Kim(2018)은 강한 난류로 형성되는 경계층 경사는 연안용승 발생에 큰 역할을 한다고 하였다. 그리고 Seo and Kim(2020)은 이와 같은 수온 구조 특성은 대마난류의 이동 경로와도 연관이 있으며 난류의 경로 변화 및 용승 및 냉수대 발생 여부와 밀접한 관련이 있다고 하였다. 본 연구에서는 TWC 수송량과 PDO 지수와의 관계를 중점적으로 파악하였다. 추후 TWC 수송량과 PDO 등의 변동이 동해 연안의 수온의 시공간 분포에 어떤 영향을 미치는지 분석할 필요가 있다.

사 사

본 논문 부경대학교 자율창의학술연구비(2021년)에 의하여 연구되었음.

References

- [1] Andres, M., J. H. Park, M. Wimbush, X. H. Zhu, H. Nakamura, K. Kim, and K. I. Chang(2009), Manifestation of the Pacific decadal oscillation in the Kuroshio, *Geophysical Research Letters*, 36(16).
- [2] Cho, K. D., C. H. Hong, K. H. Lee, J. H. Yoon, S. K. Yang, Y. K. Choi, D. S. Kim, K. W. Cho, H. D. Kim, and S. W. Kim(2005), *Descriptive Physical Oceanography*, Pukyong National University Press, pp. 119-121.
- [3] Cho, K. W. and J. H. Maeng(2007), Some thoughts on direction to cope with the sea level rise in Korea, *Journal of the Korean Society for Marine Environment & Energy*, 10(4),

- pp. 227-234.
- [4] Emery, W. J. and R. E. Thomson(1998), *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*, Pergamon Press, pp. 468-487.
- [5] Fukudome, K. I., J. H. Yoon, A. Ostrovskii, T. Takikawa, and I. S. Han(2010), Seasonal volume transport variation in the Tsushima Warm Current through the Tsushima Straits from 10 years of ADCP observations, *Journal of oceanography*, 66(4), pp. 539-551.
- [6] Gershunov, A. and T. P. Barnett(1998), ENSO influence on intraseasonal extreme rainfall and temperature frequencies in the contiguous United States: Observations and model results. *Journal of Climate*, 11(7), pp. 1575-1586.
- [7] 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(5), pp. 653-663.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Seo, H. S. and D. S. Kim(2020), Effect of El Niño and La Niña on the Coastal Upwelling in East Sea, South Korea, *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, 26(1), pp. 75-83.
- [12] 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.
- [13] Takikawa, T., J. H. Yoon, and K. D. Cho(2005), The Tsushima warm current through Tsushima Straits estimated from ferryboat ADCP data. *Journal of Physical Oceanography*, 35(6), pp. 1154-1168.
- [14] Teague, W. J., G. A. Jacobs, H. T. Perkins, J. W. Book, K. I. Chang, and M. S. Suk(2002), Low-frequency current observations in the Korea/Tsushima Strait. *Journal of Physical Oceanography*, 32(6), pp. 1621-1641.
- [15] Vinay, K. I. and G. P. John(1999), *Digital signal processing using MATLAB*, Thomson-Engineering, pp. 139-190.
- [16] Wu, C. R., Y. L. Wang, and S. Y. Chao(2019), Disassociation of the Kuroshio current with the Pacific decadal oscillation since 1999, *Remote Sensing*, 11(3), p. 276.
- [17] 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.
- [18] NOAA Climate Prediction Center, <https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/>.
- [19] Tokyo Climate Center, https://ds.data.jma.go.jp/tcc/tcc/products/el_nino/decadal/pdo_month.html.

Received : 2022. 09. 19.

Revised : 2022. 10. 24.

Accepted : 2022. 10. 28.