

# 동해 명태(*Gadus chalcogrammus*) 서식처 표층수온 장기 변동 특성

설강수\* · 이충일\*\* · 정해근\*\*\*\*

\* 경기도 해양수산자원연구소 연구사, \*\* 강릉원주대학교 해양자원육성학과 교수,

\*\*\* 강릉원주대학교 해양자원육성학과 연구원

## Long Term Changes in Sea Surface Temperature Around Habitat Ground of Walleye Pollock (*Gadus chalcogrammus*) in the East Sea

Kangsu Seol\* · Chung-Il Lee\*\* · Hae-Kun Jung\*\*\*\*

\* Researcher, Gyeonggi Province Maritime and Fisheries Research Institute, Gyeonggi 23-2, Korea

\*\* Professor, Department of Marine Bioscience, Gangneung-Wonju National University, Gangneung 254-57, Korea

\*\*\* Researcher, Department of Marine Bioscience, Gangneung-Wonju National University, Gangneung 254-57, Korea

**요약** : 동해 명태 서식처 환경은 한랭기와 온난기를 교차하며 변동을 지속하고 있다. 특히 1980년대 후반 이후 수온은 급격히 상승하였으며, 2000년대 후반 이후 다시 하강하는 특성을 나타내었다. 반면, 명태 주요 산란장이 위치한 동한만과 어장 중심이 형성되는 동해 중부 연안의 수온은 서로 다른 변동 특성을 나타내었다. 동한만의 겨울철 수온은 1980년 후반 이후 급격히 상승하였으며, 2000년 후반 이후 다시 하강하는 특성을 나타내었으며, 이러한 장기 변동특성은 2월과 3월에 더욱 뚜렷하였다. 반면 어장의 중심이 형성되는 동해 중부 연안의 수온은 1990년대 중후반 이후 지속적으로 상승하였으며, 2000년 후반 이후 수온이 하강하는 특성은 뚜렷이 나타나지 않았다. 이러한 산란장과 어장의 수온변화는 명태 자원량과 변동 특성이 유사하였다. 특히 산란장의 수온 변화는 난과 자-치어를 포함한 초기 생활사 시기의 생존율에 영향을 미치는 주요 인자로 작용한다. 1980년대에는 명태의 산란에 적합한 환경이 조성되는 면적과 지속시간이 평년보다 증가하였으며, 반대로 동해에 서식하는 명태의 자원량이 급격히 감소한 1980년대 후반 이후에는 산란장 면적과 적합한 환경이 지속되는 시간이 급격히 감소하였다. 명태 자원량 변화는 서식처의 물리적 환경변화와 유의한 상관성을 가지며, 특히 산란장의 수온 상승에 따른 산란에 적합한 환경이 조성되는 면적과 지속시간의 감소 그리고 어장의 축소는 명태 자원량 변화에 영향을 미치는 주요 인자로 작용하였다.

**핵심용어** : 동해, 명태, 산란장, 어장, 수온

**Abstract** : Oceanic conditions in walleye pollock habitat in the East Sea have shown decadal fluctuations between warm and cold periods in turn. Specifically, sea surface temperature (SST) has shown a dramatic increase between the late 1980s and the middle 2000s, and abrupt decreasing patterns after the late 2000s. Oceanic conditions in the Dong-han Bay (spawning ground) and middle eastern coastal waters (fishing ground), however, indicated different fluctuation trends in SST, increasing in the Dong-han Bay after the late 1980s, and decreasing after the late 2000s. These fluctuation patterns were especially clear in February and March. Sea surface temperature in the middle eastern coastal waters of Korea soared continuously after the late 1980s, but did not show a distinct decreasing pattern after the late 2000s compared with Dong han Bay, except for February SST values. These long term water temperature changes in both walleye pollock spawning and fishing ground are related to variation in walleye pollock landings. Especially, abrupt changes in spawning ground SST can be one of the factors influencing survival in the early ontogenesis of walleye pollock, including egg and yolk larval stages. During the 1980s, the area of suitable spawning temperature (2-5°C) was wider, and the length of Walleye pollock egg and larval stages greater compared with past and present oceanographic environments. However, such patterns did not correspond with the optimal spawning temperature range and greater length of development of walleye pollock during the late 1980s likely triggering a decline in pollock stock. In conclusion, it has been supposed that the dramatic decrease in walleye pollock landings in the East Sea since the late 1980s was caused by increasing water temperature leading to both early mortality and unsuitable spawning conditions.

**Key Words** : East Sea, Walleye pollock, Spawning ground, Fishing ground, Water temperature

\* First Author : snowriverwater@gg.go.kr, 031-8008-6511

† Corresponding Author : hkjung@gwnu.ac.kr, 033-640-2855

## 1. 서론

명태(*Gadus chalcogrammus*)는 동해를 포함한 북태평양에 널리 분포하며, 상-하위 영양단계의 연결고리 역할을 하는 중요한 생물이다(Funamoto, 2018). 또한 생활사 단계별로 서식하는 수심이 다르며, 성어는 주로 200 m 이하 수심에 서식하는 반저서성 어류이다(Funamoto, 2018). 이러한 명태는 상업적으로 유용한 생물자원이며(FAO, 2018), 전 세계 유용 수산자원 생물 중 Peruvian Anchoveta (*Engraulis ringens*)과 함께 높은 생산량을 기록한다(FAO, 2018). 우리나라를 포함한 북태평양에 서식하는 명태 어획량은 1980년대 후반 이후 급격히 감소하였으며(Noakes and Beamish, 2009), 이후 일정 수준의 자원량을 유지하는 일본 태평양(Japan Pacific Ocean), 오호츠크해(Sea of Okhotsk), 베링해(Bering Sea) 계군과는 달리 우리나라 동해 연안에 서식하는 명태 자원량은 지속적으로 감소하여, 최근에는 1톤 미만의 어획량을 기록하고 있다(Jung et al., 2017). 이러한 명태 자원량의 급격한 변화는 남획과 같은 인간의 인위적인 활동(Kang and Kim, 2015; Ianelli et al., 2016)과 함께 기후변화와 같은 대기 및 해양환경 변화의 영향을 동시에 받는다(Funamoto, 2018).

동해에 서식하는 명태 계군은 산란장의 위치에 따라 타타르(Tartar Strait, Russia), 표즈르대제만(Peter the Great Gulf, Russia), 북해도 서쪽 연안(western coastal areas off the Hokkaido and Honshu, Japan) 그리고 동한만(Dong-han Bay, North Korea)으로 구분된다(Kim and Kang, 1998). 이 중 우리나라 연안에 서식하는 명태의 주요 산란장은 동한만으로 알려져 있다(Kim and Kang, 1998; Kang and Kim, 2015). 우리나라 동해 연안의 명태 어장은 계절별로 공간적인 위치를 달리한다. 1982-1983년 우리나라 동해 연안의 명태 어장 분포 특성을 분석한 결과 어장은 35-38°N 지역에 연중 형성되지만, 어법별 중심 어장의 위치는 서로 다르게 나타났다. 명태를 대상으로 한 기선저인망 어업은 10월과 12월 그리고 이듬해 1월과 2월에 속초와 주문진을 포함한 동해 중부 연안(Middle eastern coast of Korea)에서 높은 어획량을 기록하였으며, 여름과 가을에는 동해 중부 연안역과 함께 동해 남부 연안(Southern eastern coast of Korea)에서도 높은 어획량을 기록하였다(Lee, 1991). 트롤어업은 대체로 동해 중부 연안에서 조업이 이루어졌으며, 높은 생산량이 연중 형성되고 있다. 반면 자망 어업은 12월부터 이듬해 1월과 2월에 동해 중부 연안에서 높은 어획량을 기록하였으며, 4월부터 8월에는 자망을 통한 명태 조업이 이루어지지 않았다(Lee, 1991). 이처럼

우리나라 동해 연안의 명태 어장은 주로 겨울철인 12월부터 이듬해 3월에 형성되며, 동해 중부 연안에 어장중심이 형성된다(Kang and Kim, 2015).

명태 서식의 적수온 범위는 2-10°C, 최적수온 범위는 2-5°C이며(Bailey et al., 1999), 산란 최적 수온 범위는 2-5°C이다(Nakatani, 1984; Yoo et al., 2015). 동해 연안에 서식하는 명태의 주 산란기는 12월부터 이듬해 3월까지이며(Lee et al., 2019), 주로 3-4년생 성어가 산란활동을 한다(Bachelier et al., 2010; 2012). 산란장은 주로 수심이 얇은 대륙붕 지역에 형성되며(Bailey et al., 1997; Kang and Kim, 2015), 명태의 난은 분리 부성란으로 주로 상층부에 분포한다(Kendall and Nakatani, 1992). 이 결과 겨울철 상층부의 환경 변화는 산란, 부화 그리고 자·치어의 생존까지 그 영향이 전달된다(Funamoto, 2007). 특히, 수온은 산란장의 형성 및 산란 시기 변화, 난의 부화율 및 부화 기간(Nakatani, 1984; Nakatani, 1988; Yamamoto et al., 2009) 그리고 자·치어의 생존 및 성장률에 영향을 미쳐(Nakatani, 1984; Nishimura et al., 2002; Yoo et al., 2015), 연급군의 강도 및 자원량 변화에까지 그 영향이 전달된다(Funamoto, 2007).

알라스카만에 서식하는 명태의 가입 강도는 서식처의 환경변화로 인한 섭식생태 및 포식압의 변화에 영향을 받는다(Megrey et al., 1995). 봄철 수온의 하강과 강한 바람은 유생의 사망률을 높이는 주요 인자로 작용하지만 수주(water column)의 강한 혼합에 따른 동물플랑크톤의 풍도 증가는 미성어 시기의 명태 자원의 먹이 생물 공급에 긍정적인 영향을 미친다(Ciannelli et al., 2004). 또한 가을철 수온 상승에 따른 포식자의 밀도 증가는 초기 생활사 시기의 생존율 감소에 영향을 미치는 주요 인자로 작용한다(Bailey, 2000). 일본 동부 태평양 계군의 자원량은 Kurhoso-Oyashio extension 지역의 표층수온의 변화와 1-2년의 시간 지연을 가지며 변동하고 있으며, 이러한 산란장 및 서식처의 물리적 환경변화는 자원량과 재생산력에까지 그 영향이 전달된다(Oh et al., 2004; Funamoto, 2007; Funamoto et al., 2013). 특히, 오야시오 해류(Oyashio Current)의 강도와 중심 축의 공간적인 위치 변화는 난과 자·치어의 부화와 밀집도 그리고 성육장으로의 수송에 영향을 미치며, 오야시오 해류가 일본 동부 연안역을 따라 남하하는 경우 명태의 자·치어 생존율과 그 해 연급군의 자원량은 증가한다(Isoda, 1998; Sakurai and Miyake, 1994). 또한 서식처의 수주 구조변화에 따른 명태 자원의 공간적인 위치 변화는 공식과 피식압의 변화 그리고 부화 이후 자·치어의 생존율에 영향을 미친다(Funamoto et al., 2013; 2014).

우리나라 동해 연안에 서식하는 명태의 자원량과 어장의 면적은 1980년대 후반 이후 급격히 감소하였다(Kang and Kim, 2015; Jung et al., 2017). 이러한 자원량 및 어장의 공간적인 위치 변화는 남획과 같은 인간의 인위적인 활동과 서식처의 급격한 환경 변화의 영향을 동시에 받는다(Kang and Kim, 2015; Jung et al., 2017). 특히 명태의 성육장 및 산란장 수온 변화는 명태 자원의 생태학적 반응을 거쳐 연급군의 강도 변화에 영향을 미치며(Oh et al., 2004; Yoo et al., 2015), 명태 자원 변화의 원인과 기작 이해를 위한 중요한 인자로 작용한다(Wespestad, 1996). 이에 본 연구에서는 물리적 환경 요인 중 수온 변화에 관점을 두어 명태 서식처의 수온과 자원량 변화 사이의 관계를 규명하고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 동해 연안 표층수온 변동 특성

동해 연안 표층수온 변동특성을 분석하기 위해 OSTIA reanalysis data (The Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis)를 1981년부터 2019년까지 매년 12월부터 3월의 표층수온 자료를 이용하였다(Donlon et al., 2012). OSTIA reanalysis data는 전 지구 규모의 표층수온과 해빙(Sea Ice)자료를 0.05° 격자로 제공하며, ICOADS(International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set)(Worely et al., 2005) 현장 관측 자료와 AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer)(NOCD, 2009) 그리고, ATSR(Along-track Scanning Radiometer)(NEODC, 2009)를 이용하여 재분석된 자료이다.

동해 연안 표층수온의 10년 주기 변동 특성을 규명하기 위해 각 연대별(1981-1989년, 1990-1999년, 2000-2009년, 2010-2019년)로 겨울철(1월, 2월, 3월) 월별 평균치를 계산하여 동해 연안의 공간적인 위치 변화를 분석하였으며, 이와 함께 동한만(39-40°N, 127.5-128.5°E)과 동해 중부 연안(37-38°N, 128-129.5°E)의 12월, 1월, 2월, 3월 수온의 장기 변동 특성을 분석하였다(Fig. 1). 이와 함께 sequential t-test analysis of regime shift (STARS)(Rodionov, 2004) 분석 방법을 이용해 수온의 장기 변동 특성 및 급격한 변화 시점을 분석하였다. STARS는 t 검증 분석 방법을 이용하여 연속적인 시계열 관측자료 중 평균으로부터 급격한 변동 시점을 유의수준 범위 내에서 분석한다(Rodionov, 2004).

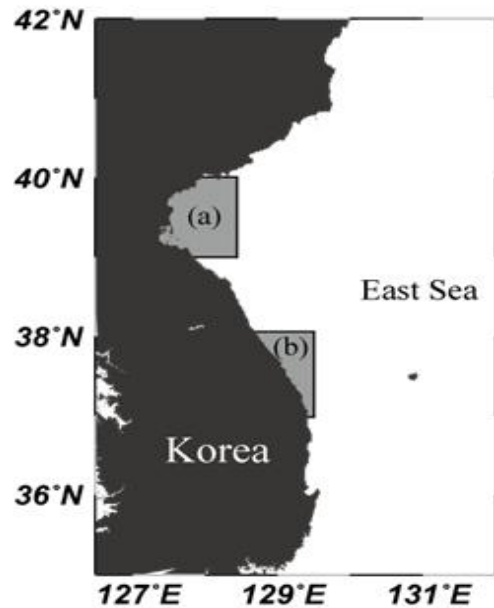


Fig. 1. Map of study area related with sea surface temperature (SST) and spawning ground in Dong-han Bay (a) and middle eastern coast of Korea (b).

### 2.2 산란에 적합한 수온이 형성되는 면적 산정

동한만 주변(39-40°N, 127.5-128.5°E)과 동해 중부 연안(37-38°N, 128-129.5°E)(Fig. 1)에 형성되는 산란장의 수온 변화를 분석하기 위해 산란 최적 수온 범위(2-7°C)(Nakatani, 1984)와 수조 실험을 통해 도출된 유생의 낮은 초기 사망률을 나타내는 수온 범위(3-5°C)(Yoo et al., 2015)를 이용하여, 산란과 부화에 적합한 수온 범위를 2-5°C로 규정하였다. 이와 함께 동해 중부 연안에 서식하는 명태(Lee et al., 2019)와 동한만과 유사한 물리적 환경 특성을 나타내는 해역에 산란장이 위치한 일본 태평양 계군(Japan Pacific stock)(Nishimura et al., 2002), 동해 중부 계군(northern East Sea stock)(Natsume, 1993)의 성 성숙 시기를 고려하여 1월부터 3월을 주 산란시기로 선정하였다.

산란장 면적은 0.05° 격자로 제공되는 OSTIA reanalysis data를 이용하였으며, 산란에 적합한 수온 조건이 형성되는 격자의 개수를 산정하여 면적을 산출하였다. 이와 함께 각 해역의 전체 면적 중 1월부터 3월까지 지속적으로 산란에 적합한 환경이 조성되는 면적이 차지하는 비율을 계산하였다.

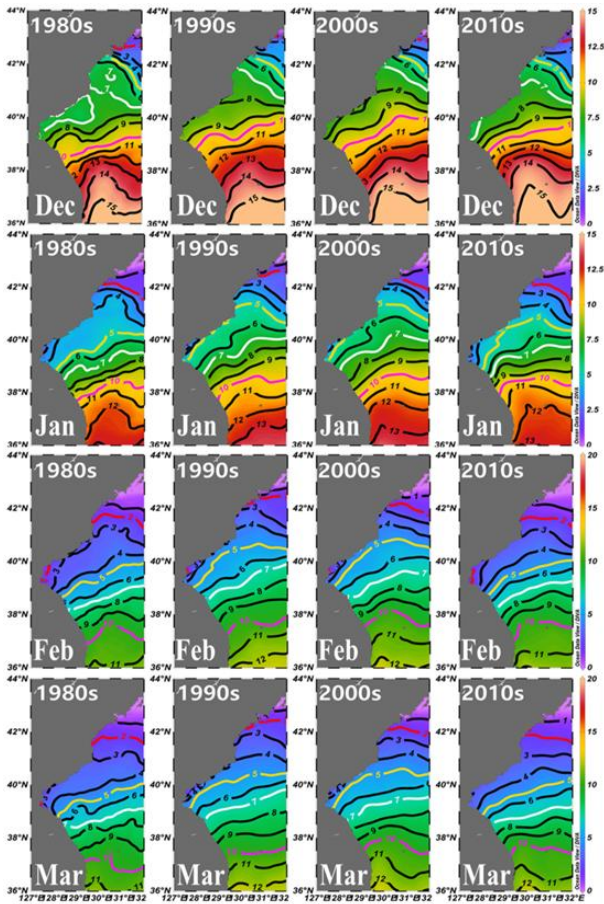


Fig. 2. Horizontal distributions of decadal mean of sea surface temperature (SST) in the East Sea during winter (December, January, February and March).

### 3. 결과

#### 3.1 동해 연안 표층수온의 장기 변화

동해 중부 연안과 북한 동한만을 포함한 동해 연안의 겨울철 표층수온은 12월 이후 지속적으로 하강하였다. 12월 동한만 주변 수온은 7-10°C 범위를 나타내었으며, 동해 중부 연안의 수온은 9-12°C 범위를 나타내었다(Fig. 2). 1월 이후 동한만 주변 수온은 2-5°C, 동해 중부해역의 수온은 5-8°C 범위를 나타내었다(Fig. 2). 2°C 등온선은 주로 42°N 부근, 5°C 등온선은 39°N, 7°C 등온선은 38°N 부근에 형성되었다(Fig. 2). 동해의 표층수온은 1990년대 이후 지속적으로 상승하였으며, 이후 2010년대에 다시 하강하는 특성을 나타낸다(Fig. 2). 겨울철(1월부터 3월) 5°C 등온선은 1980년대 39°N 부근에 위치하였으며, 이후 지속적으로 북상하여 2000년대에는 42°N 부근에 위치하였다(Fig. 2). 이후 2010년에는 표층수온이 하강하

여 5°C 등온선의 위치가 39°N 부근으로 남하 하였다(Fig. 2).

1980년대 동한만 주변의 2-5°C 수온 범위는 1월부터 3월까지 유지되었지만, 1990년대와 2000년대에는 시기가 단축되어 2월부터 3월까지 형성되었다(Fig. 2). 동해 중부연안의 표층수온은 1980년대 5-9°C 범위를 보였지만, 1990년대와 2000년대에는 7-10°C 범위를 나타내고 2010년대에는 다시 5-9°C 범위를 나타낸다(Fig. 2). 이처럼 동해의 표층수온은 한랭기와 온난기를 교차하며 지속적인 변동을 거듭하고 있으며, 1990년대 이후 급격히 수온이 상승하였으며, 이후 2010년대에는 다시 수온이 하강하여 1980년대의 표층수온의 수평 분포 특성과 유사한 형태를 나타낸다(Fig. 2).

#### 3.2 동한만과 동해 중부 연안 표층수온의 장기 변화

명태 산란장이 위치한 동한만 주변(39-40°N, 127.5-128.8°E)과 어장의 중심이 형성되는 동해 중부 연안(37-38°N, 128-129.5°E)의 표층수온의 장기 변화는 유의한 상관관계를 가지며 변동을 지속한다(Figs. 3 and 4, Table 1). 특히, 3월의 동한만과 동해 중부 연안의 수온 사이의 상관관계수는 가장 높게 나타나며, 두 지역의 12월 수온 사이의 상관관계수는 비교적 낮았다(Table 1).

Table 1. Correlation coefficient between sea surface water temperature in Dong-han Bay and middle eastern coast of Korea

Dong-han Bay	Middle eastern coastal water of Korea			
	Dec	Jan	Feb	Mar
Dec	0.44*	0.47*	0.36**	0.23 <sup>N</sup>
Jan	0.39**	0.66*	0.47*	0.50*
Feb	0.32 <sup>N</sup>	0.51*	0.61*	0.75*
Mar	0.25 <sup>N</sup>	0.44*	0.50*	0.80*

\*p-value < 0.01, \*\* p-value < 0.05. N p-value > 0.05.

동한만의 표층수온은 1980년대 후반 이후 급격히 상승하였으며, 이러한 변동 특성은 12월과 3월 보다는 1월과 2월에 더욱 뚜렷하게 나타났다(Fig. 3). 이후 2000년 후반에는 다시 수온이 급격히 하강하였다(Fig. 3). 동해 중부 연안의 표층수온은 동한만과는 달리 1990년대 중후반 이후 급격히 상승하였으며(Fig. 4), 2000년대 후반 수온이 급격히 하강하는 동한만과는 달리 동해 중부 연안 수온은 지속적으로 상승하였다(Fig. 4). 하지만 2월 수온은 동한만의 수온 변동 특성과 유사하게 2000년 후반에 급격히 하강하였다(Fig. 4).

동해 명태(*Gadus chalcogrammus*) 서식처 표층수온 장기 변동 특성

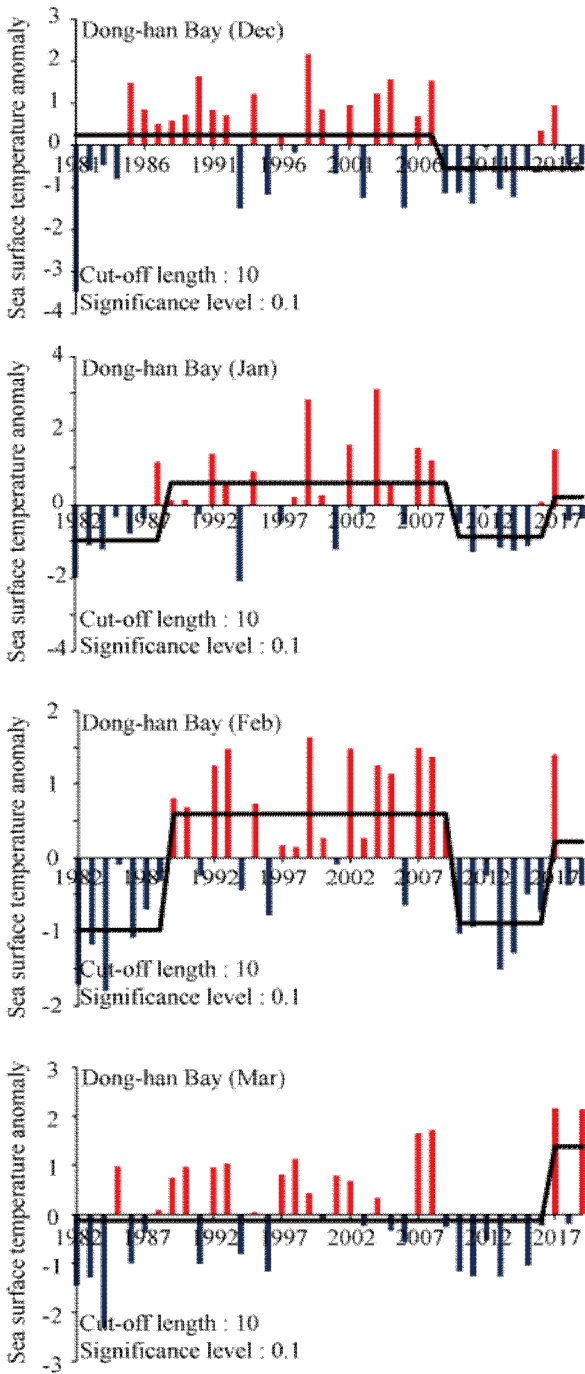


Fig. 3. Long term changes in sea surface temperature (SST) anomaly in Dong-han Bay during winter (December, January, February and March) (Black lines indicate STARS analysis).

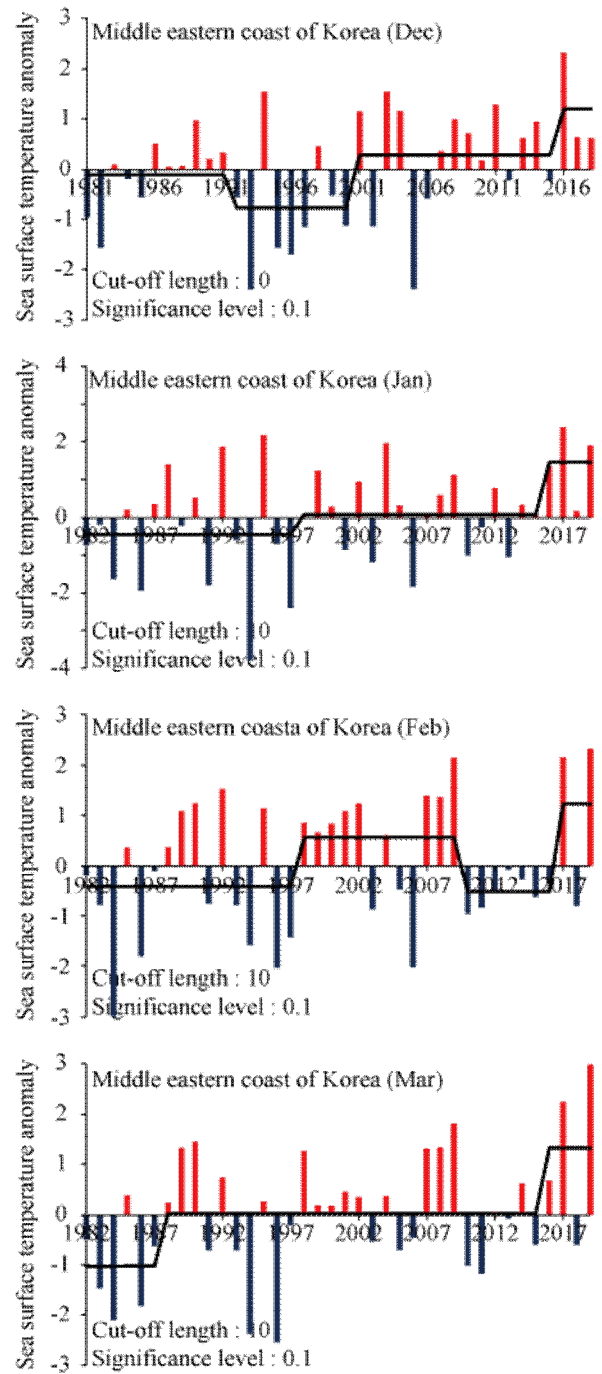


Fig. 4. Long term changes in sea surface temperature (SST) anomaly in middle eastern coast of Korea during winter (December, January, February and March) (Black lines indicate STARS analysis).



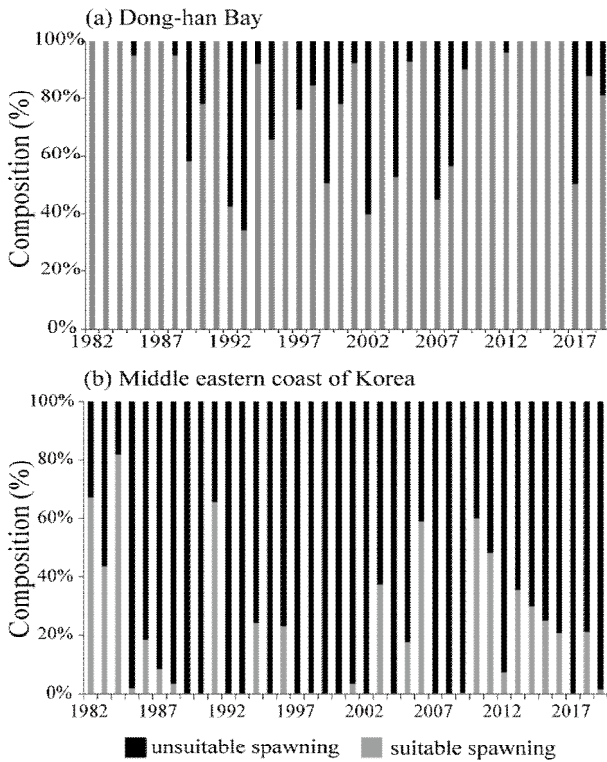


Fig. 5. Long term changes in relatively suitable and unsuitable spawning area of walleye pollock in Dong-han Bay (a) and middle eastern coast of Korea (b).

### 3.3 산란에 적합한 수온이 형성되는 면적 변화

동한만과 동해 중부 연안에서 명태 산란에 적합한 환경 (2-5°C)이 형성되는 면적과 지속시간의 변화를 분석하였다. 1980년대부터 2019년까지 동한만 주변에서는 산란에 적합한 수온이 지속적으로 형성되었다(Fig. 5). 하지만 산란에 적합한 환경의 면적은 1990년 이후 지속적으로 감소하였으며, 2010년대에 다시 증가하는 특성을 나타낸다(Fig. 5). 연간 산란에 적합한 수온이 형성되는 면적의 변화는 시기별로 뚜렷한 변화를 나타내었다(Fig. 5). 1980년대에는 동한만 전체 면적의 90% 이상에서 산란에 적합한 수온 조건이 형성되었으며(Fig. 5), 1990년대와 2000년대에는 급격하게 감소하여 전체 면적 중 산란장 수온 조건이 형성되는 면적은 65-70%를 차지하였다(Fig. 5). 이후 2010년대에는 다시 증가하여 90% 이상을 차지하였다(Fig. 5). 이와 함께 산란에 적합한 환경이 1월부터 3월까지 지속적으로 유지되는 면적은 시기별로 뚜렷한 변화를 나타내었다(Fig. 6). 1980년대에는 1월부터 3월까지 지속적으로 산란장 환경이 형성되는 면적은 동한만의 70% 이상을 차지하였으며(Fig. 6), 이후 1990년대와 2000년대에는 급격히 감소하여 동한만 전체 면적의 30% 이하를 차지하였다(Fig. 6). 이후 2010년대에는 증가하여 60% 이상의

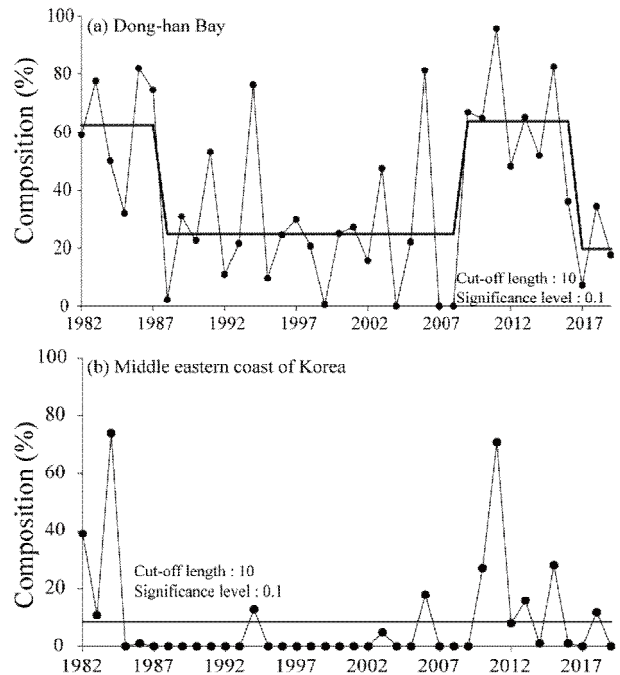


Fig. 6. Long term trends in ratio of spawning area of walleye pollock formed from January to March in Dong-han Bay (a) and middle eastern coast of Korea (b) (Black lines indicate STARS analysis).

면적에서 산란에 적합한 환경이 조성되었으며(Fig. 6), 이는 1980년대의 산란장 환경과 유사하였다(Fig. 6). 동해 중부 연안은 동한만에 비해 산란에 적합한 환경 범위가 형성되는 면적과 지속 시간의 규모는 작다(Fig. 5). 하지만 1980년대와 2010년대에는 산란장 환경이 조성되는 면적이 평균보다 증가하였으며(Fig. 5), 1월부터 3월까지 지속적으로 산란장 수온이 형성되는 면적은 1980년대 초반 그리고 2000년 후반에 높게 나타난다(Fig. 6).

## 4. 고찰

동해 명태 서식처 환경은 한랭기와 온난기를 교차하며 변동을 지속하고 있다. 특히 1980년대 후반 이후 표층수온은 급격히 상승하였으며, 2000년 후반 이후 다시 하강하는 장기 변동 특성을 나타낸다. 1990년대 이후 2, 5, 7, 10°C 등온선은 지속적으로 북상하였으며, 이와 같은 현상은 2000년대까지 지속되었다. 반면 2010년대 표층수온의 수평분포는 1980년대와 유사한 형태를 나타내었다.

동해를 포함한 우리나라 주변 해양환경은 쿠로시오 해류와 이로부터 분리되어 동해로 유입되는 대마난류의 영향을 받는다(Hong and Cho, 1983). 대마난류의 세기가 약한 시기에는

동해 연안을 따라 북상하는 동한난류의 중심이 외양으로 떨어져 흐르게 되며, 반대로 대마난류의 세기가 강한 시기에는 동해 연안을 따라 북상하는 난류수의 중심이 동해 연안을 따라 고위도 지역으로 확장하게 된다(Hong and Cho, 1983).

Na and Paeng(1992)은 1977, 1987, 1981, 1984, 1986년 2월과 4월에 동해 연안을 따라 북상하는 동한난류의 영향이 약화되었다고 하였으며, 이 중 명태 최대 어획량을 기록한 1981년은 동해 상층부에 상대적으로 수온이 낮은 수괴가 넓게 분포하였다. 명태와는 반대로 상대적으로 온난한 환경을 선호하는 살오징어(*Todarodes pacificus*) 어장의 장기변화 또한 동한난류의 중심 위치변화와 유의한 상관성을 나타내었다(Kim et al., 2017). 1990년대와 2000년대에는 주로 동해 연안에 살오징어 어장이 형성되었으며, 1980년대에는 어장의 중심이 동해 연안으로부터 떨어진 외양에 형성되었다(Kim et al., 2017). 이처럼 동한난류의 강도와 중심축의 공간적인 위치 변화는 동해 연안 환경과 수산자원 생물의 분포에 영향을 미치는 주요 인자로 작용한다(Hong and Cho, 1983).

동해에 위치하는 명태 산란장과 성육장의 환경 변화는 일본 태평양계군(Japanese Pacific Stock)의 서식처 환경 변화와 유사하였다. 일본 태평양계군의 주요 산란장은 홋카이도(Hokkaido) 남동쪽에 위치한 분칸만(Funka Bay)이며, 주요 성육장은 홋카이도 동쪽 해역과 혼슈(Honshu) 동북부의 도호쿠(Tohoku) 주변 해역이다. 이 지역은 북쪽으로부터 상대적으로 수온이 낮은 오야시오 해류가 유입되며, 홋카이도와 혼슈의 아오모리현(Aomori Prefecture) 사이에 위치한 쓰가루 해협(Tsugaru Strait)을 통해 난류수가 유입된다. 이와 함께 남쪽으로부터 고온, 고염의 쿠로시오해류가 유입된다. 1980년대의 일본 태평양계군의 주 산란장 및 성육장 주변 환경은 평년보다 한랭한 상태였으며, 북쪽으로부터 연안을 따라 남하하는 오야시오 해류의 강도가 강화됨에 따라 오야시오 기원의 상대적으로 낮은 수온의 수괴가 혼슈 동북부에 있는 도호쿠 해역까지 분포하였다(Nihira, 2003). 이후 1990년대는 쓰가루 해류(Tsugaru Current)와 쿠로시오 해류의 강도가 강화됨에 따라 오야시오 수괴의 영향이 약화되었다. 이 결과 1980년대 도호쿠 해역 주변에 위치한 오야시오 남방한계선(Oyashio Southern Limit Position)은 1990년대 이후 북쪽으로 북상하였으며(Nihira, 2003; Nihira, 2006), 산란장의 수온 상승과 함께 명태 난과 자·치어의 밀도는 감소하였다(Hamatsu et al., 2004a). 이처럼 해류의 상태변화에 따른 명태 산란장의 환경변화는 명태 초기생활사 시기의 생존율에 영향을 미치는 주요 인자로 작용한다.

동해 연안을 따라 북상하는 동한난류의 강도변화는 대양의 대기 및 해류의 상태변화에 영향을 받는다(Jung et al.,

2017; Rahman et al., 2019). 우리나라 동해의 환경 변화에 영향을 미치는 대마난류는 동중국해로부터 열에너지를 동해로 유입시키며, 동해 상층부 순환에 영향을 미치는 주요 인자로 작용한다(Guo et al., 2006). 우리나라 동해 연안에서 난류수의 수평 및 연직적인 확장은 쿠로시오 해류의 유속이 평년보다 감소했던 시기에 더욱 강화되었으며, 염분은 쿠로시오 해류의 유속이 강한 시기에 평년보다 하강하였다(Jung et al., 2017). 쿠로시오 해류가 강화된 시기에는 강화된 에크만 수송(Ekman transport)에 의해 동중국해에서의 쿠로시오 해류의 중심축은 진행방향의 오른쪽으로 편향되어 흐르며(Wu et al., 2019), 이 결과 쿠로시오에서 분리되어 동해로 유입되는 난류수는 감소한다(Jung et al., 2017). 이처럼 대한해협을 통해 우리나라 동해로 유입되는 난류수는 쿠로시오 해류의 강도 변화와 상반되는 형태로 변화를 거듭한다.

명태 연급군의 강도는 먹이생물의 풍도와 포식압 그리고 물리적 환경변화의 영향을 동시에 받는다. 특히 명태의 사망률은 초기 생활사 시기에 가장 높으며, 알래스카만 주변에 분포하는 명태의 경우 부화 후 5개월 이내에 66-84%가 사망한다(Bailey et al., 1996). 이러한 초기 생활사 시기의 높은 사망률은 산란장과 성육장의 물리 및 생물학적 환경변화의 영향을 동시에 받는다(Iles and Sinclair, 1982; Bailey et al., 2005). 특히, 산란장 및 성육장의 수온 변화에 따른 산란에 적합한 환경이 조성되는 시기(Hinckley et al., 2001)와 난과 유생의 분포 및 수송(Wilson, 1996) 그리고 먹이 생물의 풍도 변화는 초기 생활사 시기 난과 자·치어의 생존율에 영향을 미치는 주요 인자로 작용한다(Napp et al., 2000; Honda et al., 2004).

동해에 서식하는 명태의 산란장은 수온의 시·공간적 변동에 영향을 받는다. 특히 1990년대 이후 산란에 적합한 환경이 조성되는 면적과 유지되는 기간은 축소되었다. 이러한 산란장의 수온 상승은 초기생활사 시기의 난과 자·치어의 생존율에 직접적인 영향을 미친다. 일본 분칸만(Funka Bay)에 서식하는 명태로부터 추출된 난을 이용하여 수온 변화에 따른 난의 부화율을 분석한 결과 10°C에서는 0.3-35.8%의 부화율을 나타내었으며, 6°C에서는 71.7-83%, 2°C에서는 83-90.9%의 부화율을 나타내었다(Hamai et al., 1971). 부화 후 자어는 3-5°C 이상의 수온에서 급격히 사망률이 증가하는 특징을 나타내었다(Yoo et al., 2015). 반면 자어의 성장은 수온이 증가할수록 빠르게 진행된다. 난에서 부화 후 체장이 5.6 mm까지 성장하는데 소요되는 시간은 10°C에서 13일, 6°C에서 16일, 2°C에서 29일로 나타났으며, 수온이 상승할수록 성장하는데 소요되는 시간이 단축되었다(Hamai et al., 1971). 높은 수온 조건에서의 명태의 에너지 대사는 더욱 활발해지며, 이에 따른 성장 속도는 차가운 수온 조건보다 빠르게

나타난다(Porter, 2001). 하지만 대사량이 높은 만큼 풍부한 먹이가 지속적으로 공급되어야 하며, 빠른 시간내에 먹이를 섭취하지 않으면 고수온 조건에서의 사망률은 증가 한다 (Bailey and Stehr, 1986).

명태 초기생활사 시기의 환경변화는 명태 가입 강도를 결정하는 중요한 요인으로 작용한다. 명태 가입은 대체로 생존율이 낮은 초기 생활사시기에 결정되며 자·치어의 생존이 연급군의 강도를 결정한다(Kendall and Duker, 1998). 특히 수온은 난과 자·치어의 생존율에 직접적인 영향을 미치는 인자이며, 이러한 수온 변화는 명태 자원량에까지 그 영향이 전달된다(Kendall and Nakatani, 1992; Nishimura et al., 2002; Hamatsu et al., 2004b). 우리나라 명태의 자원은 1980년대 후반 이후 급격하게 감소하였으며 2000년 이후에는 1톤 미만의 어획량을 기록했다. 이러한 자원량 변화는 서식처의 물리적 환경변화와 유의한 상관성을 가지며 특히 산란장의 수온 상승과 이에 따른 산란에 적합한 환경이 조성되는 면적과 지속시간의 감소 그리고 서식처의 수온 상승에 따른 어장의 공간적인 축소가 동해에 서식하는 명태 자원량의 급격한 감소의 주요 원인으로 작용하였을 것이라 판단된다.

## 5. 결론

동해 연안 표층수온은 1980년대 후반 이후 급격히 상승하였으며, 2000년대 후반 이후 다시 하강하는 장기 변동 특성을 나타낸다. 이러한 표층수온의 변화는 명태 산란장의 면적과 산란에 적합한 수온이 유지되는 시간에 영향을 미친다. 명태 자원량이 급격히 감소한 1980년대 후반 이후에는 서식처의 표층수온의 상승과 함께 산란에 적합한 수온 조건이 형성되는 면적과 산란 환경이 유지되는 시간이 급격히 감소하였다. 이러한 산란장의 물리적 환경 변화는 명태 초기 생활사 시기의 생존율에 영향을 미치며, 나아가 자원량 변화에까지 그 영향이 전달되었다.

## 사 사

이 논문은 2020년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술원의 지원을 받아 수행된 연구임(장기해양생태 연구사업, 강원씨그랜트, MICT기반 명태 수산자원 회복·관리 기술 개발).

## References

[1] Bacheler, N. M., L. Ciannelli, K. M. Bailey, and V. Bartolino(2012), Do walleye pollock exhibit flexibility in

where or when they spawn based on variability in water temperature?, Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, Vol. 65, pp. 208-216.

- [2] Bacheler, N. M., L. Ciannelli, K. M. Bailey, and J. T. Duffy-Anderson(2010), Spatial and temporal patterns of walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) spawning in the eastern Bering Sea inferred from egg and larval distributions, Fisheries Oceanography, Vol. 19, No. 2, pp. 107-120.
- [3] Bailey, K. M.(2000), Shifting control of recruitment of walleye pollock *Theragra chalcogramma* after a major climatic and ecosystem change, Marine Ecology Progress Series, Vol. 198, pp. 215-224.
- [4] Bailey, K. M. and C. L. Stehr(1986), Laboratory studies on the early life history of the walleye pollock, *Theragra chalcogramma* (Pallas), Journal of experimental marine biology and ecology, Vol. 99, No. 3, pp. 233-246.
- [5] Bailey, K. M., L. Ciannelli, N. A. Bond, A. Belgrano, and N. C. Stenseth(2005), Recruitment of walleye pollock in a physically and biologically complex ecosystem: a new perspective, Progress in Oceanography, Vol. 67, No. 1-2, pp. 24-42.
- [6] Bailey, K. M., P. J. Stabeno, and D. A. Powers(1997), The role of larval retention and transport features in mortality and potential gene flow of walleye pollock, Journal of Fish Biology, Vol. 51, pp. 135-154.
- [7] Bailey, K. M., R. D. Brodeur, and A. B. Hollowed(1996), Cohort survival patterns of walleye pollock, *Theragra chalcogramma*, in Shelikof Strait, Alaska: a critical factor analysis, Fisheries Oceanography, Vol. 5, pp. 179-188.
- [8] Bailey, K. M., T. J. Quinn II, R. Bentzen, and W. S. Grant(1999), Population structure and dynamics of walleye pollock, *Theragra chalcogramma*, In Advances in Marine Biology, Vol. 37, pp. 179-255.
- [9] Ciannelli, L., K. S. Chan, K. M. Bailey, and N. C. Stenseth(2004), Nonadditive effects of the environment on the survival of a large marine fish population, Ecology, Vol. 85, No. 12, pp. 3418-3427.
- [10] Donlon, C. J., M. Martin, J. Stark, J. Roberts-Jones, E. Fiedler, and W. Wimmer(2012), The operational sea surface temperature and sea ice analysis (OSTIA) system, Remote Sensing of Environment, Vol. 116, pp. 140-158.
- [11] FAO(2018), Food and Agriculture Organization, Fishery and Aquaculture Statistics. Global capture production 1950 2016 (FishstatJ), FAO Fisheries and Aquaculture Department.



- [12] Funamoto, T.(2007), Temperature dependent stock recruitment model for walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) around northern Japan, Fisheries Oceanography, Vol. 16, No. 6, pp. 515-525.
- [13] Funamoto, T.(2018), Population Dynamics of Demersal Fish Focusing on Walleye Pollock (*Gadus chalcogrammus*), In Fish Population Dynamics, Monitoring, and Management, Springer, Tokyo, pp. 51-75.
- [14] Funamoto, T., O. Yamamura, O. Shida, K. Itaya, K. Mori, Y. Hiyama, and Y. Sakurai(2014), Comparison of factors affecting recruitment variability of walleye pollock *Theragra chalcogramma* in the Pacific Ocean and the Sea of Japan off northern Japan, Fisheries science, Vol. 80, No. 2, pp. 117-126.
- [15] Funamoto, T., O. Yamamura, T. Kono, T. Hamatsu, and A. Nishimura(2013), Abiotic and biotic factors affecting recruitment variability of walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) off the Pacific coast of Hokkaido, Japan, Fisheries Oceanography, Vol. 22, No. 3, pp. 193-206.
- [16] Guo, X., Y. Miyazawa, and T. Yamagata(2006), The Kuroshio onshore intrusion along the shelf break of the East China Sea: The origin of the Tsushima Warm Current, Journal of Physical Oceanography, Vol. 36, No. 12, pp. 2205-2231.
- [17] Hamai, I., K. Kyushin, and T. Kinoshita(1971), Effect of temperature on the body form and mortality in the developmental and early larval stages of the Alaska pollack, *Theragra chalcogramma* (Pallas), Bulletin of the faculty of fisheries hokkaido universiry, Vol. 22, No. 1, pp. 11-29.
- [18] Hamatsu, T., K. Yabuki, and K. Watanabe(2004a), Decadal changes in reproduction of walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) off the Pacific coast of northern Japan, Fisheries Oceanography, Vol. 13, pp. 74-83.
- [19] Hamatsu, T., K. Yabuki, and K. Watanabe(2004b), Decadal changes in reproduction of walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) off the Pacific coast of northern Japan, Fisheries Oceanography, Vol. 13, pp. 74-83.
- [20] Hinckley, S., A. J. Hermann, K. L. Mier, and B. A. Megrey(2001), Importance of spawning location and timing to successful transport to nursery areas: a simulation study of Gulf of Alaska walleye pollock, ICES Journal of Marine Science, Vol. 58, No. 5, pp. 1042-1052.
- [21] Honda, S., T. Oshima, A. Nishimura, and T. Hattori(2004), Movement of juvenile walleye pollock, *Theragra chalcogramma*, from a spawning ground to a nursery ground along the Pacific coast of Hokkaido, Japan, Fisheries Oceanography, Vol. 13, pp. 84-98.
- [22] Hong, C. H. and K. D. Cho(1983), The northern boundary the Tsushima current and it's foudtuations, Journal of the Oceanological Society of Korea, Vol. 18, No. 1, pp. 1-9.
- [23] Ianelli, J. N., T. Honkalehto, S. J. Barbeaux, B. E. Fissel, and S. Kotwicki(2016), Assessment of the walleye pollock stock in the Eastern Bering Sea, in stock Assessment and Fishery Evaluation Report of the Ground fish Resources of the Bring Sea/Aleutian islands Regions. Anchorage: North Pacific Fisheries Management Councill, Section 1, pp. 49-148.
- [24] Iles, T. D. and M. Sinclair(1982), Atlantic herring: stock discreteness and abundance, Science, Vol. 215, No. 4533, pp. 627-633.
- [25] Isoda, Y.(1998), Interannual variations of oceanic conditions related to the walleye pollock population around the Pacific sea area, south of Hokkaido, Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries, Vol. 62, pp. 1-11.
- [26] Jung, H. K., S. M. Rahman, C. K. Kang, S. Y. Park, S. H. Lee, H. J. Park, and C. I. Lee(2017), The influence of climate regime shifts on the marine environment and ecosystems in the East Asian Marginal Seas and their mechanisms, Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, Vol. 143, pp. 110-120.
- [27] Kang, S. K. and S. A. Kim(2015), What caused the collapse of walleye pollock population in Korean waters?, KMI International Journal of Maritime Affairs and Fisheries, Vol. 7, No. 1, pp. 43-58.
- [28] Kendall, A. W. and G. J. Duker(1998), The development of recruitment fisheries oceanography in the United States, Fisheries Oceanography, Vol. 7, No. 2, pp. 69-88.
- [29] Kendall, A. W. and T. Nakatani(1992), Comparisons of early-life-history characteristics of walleye Pollock *Theragra chalcogramma* in shelikof Strait, Gulf of Alaska and Funka Bay, Hokkaido, Japan Fishery Bulletin, Vol. 90, No. 1, pp. 129-138.
- [30] Kim, S. A. and S. K. Kang(1998), The status and research direction for fishery resources in the East Sea/Sea of Japan, Journal of Korean Society Fish Research, Vol. 1, pp. 44-58.
- [31] Kim, Y. H., K. H. Choi, and C. I. Lee(2017), Migration and Distribution of the Common Squid (*Todarodes Pacificcus*) in Korean Waters, Journal of Environmental Science International, Vol. 26, No. 2, pp. 173-181.
- [32] Lee, C. I., M. H. Han, H. K. Jung, H. J. Park, and J. M.

- Park(2019), Spawning Season, and Factors Influencing Allometric Growth Pattern and Body Condition of Walleye Pollock *Gadus chalcogrammus* in the Middle East Sea Korea, Korean Journal of Ichthyology, Vol. 31, No. 3, pp. 141-149.
- [33] Lee, J. U.(1991), Estimation on optimum fishing effort of walleye pollock fishery in the east coast of Korea: Based on the economic analysis between Danish seine fishery and trawl fishery for walleye pollock, J Fish Bus Admin, Vol. 22, No. 2, pp. 75-99.
- [34] Megrey, B. A., S. J. Bograd, W. C. Rugen, A. B. Hollowed, P. J. Stabeno, S. A. Macklin, and W. J. Ingraham Jr(1995), An exploratory analysis of associations, Climate Change and Northern Fish Populations, Vol. 121, p. 227.
- [35] Na, J. Y. and D. G. Paeng(1992), Influences of the Sea Surface Wind on Current and Thermal Structures in the Southwestern Part of the East Sea of Korea, Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, Vol. 25, No. 1, pp. 15-28.
- [36] Nakatani, T.(1984), Thermal effect on the development of walleye pollock eggs and their upward speed to the surface, Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries, Vol. 50, No. 6, pp. 937-942.
- [37] Nakatani, T.(1988), Studies on the early life history of walleye pollock *Theragra chalcogramma* in Funka Bay and vicinity, Hokkaido, Memoirs of the Faculty of Fisheries Hokkaido University, Vol. 35, No. 1, pp. 1-46.
- [38] Napp, J. M., A. W. Kendall, and J. D. Schumacher(2000), A synthesis of biological and physical processes affecting the feeding environment of larval walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) in the eastern Bering Sea, Fisheries Oceanography, Vol. 9, No. 2, pp. 147-162.
- [39] Natsume, M.(1993), Ecology of walleye pollock, *Theragra chalcogramma*, larvae and juveniles in the Sea of Japan off northern Hokkaido-II, Daily depth distribution and gear efficiency of beam trawl net, Scientific Reports of the Hokkaido Fisheries Experimental, Station, Vol. 42, pp. 143-148.
- [40] NEODC(2009), Fact sheet: AATSR. (Available online at <http://neodc.nerc.ac.uk/?option=displaypageandItemid=91&op=pageandSubMenu=-1>).
- [41] Nihira, A.(2003), Regime-shift observed in the demersal fishes in Sanriku and Jyoban (the east-north of Honsyu, Japan) areas, Gekkan Kaiyo, Vol. 35, No. 2003, pp. 107-116.
- [42] Nihira, A.(2006), The responses of demersal fish populations to climatic regime shifts, Gekkan Kaiyo, Vol. 38, No. 2006, pp. 192-199.
- [43] Nishimura, A., T. Hamatsu, K. Yabuki, and O. Shida(2002), Recruitment fluctuation and biological responses of walleye pollock in the Pacific coast of Hokkaido, Fisheries science, Vol. 68, No. 1, pp. 206-209.
- [44] Noakes, D. J. and R. J. Beamish(2009), Synchrony of marine fish catches and climate and ocean regime shifts in the North Pacific Ocean, Marine and Coastal Fisheries: Dynamics, Management, and Ecosystem Science, Vol. 1, No. 1, pp. 155-168.
- [45] NODC(2009), 4 km Pathfinder version 5 user guide. (Available online at <http://www.nodc.noaa.gov/SatelliteData/pathfinder4km/userguide.html>).
- [46] Oh, T. G., K. Sakuramoto, and S. G. Lee(2004), The Relationship between Spawning Area Water Temperature and Catch Fluctuation of walleye pollock in the East Sea/ Sea of Japan, Journal of the Korean Fishery Society, Vol. 6, pp. 1-13.
- [47] Porter, S. M.(2001), Effects of size and light on respiration and activity of walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) larvae, Journal of experimental marine biology and ecology, Vol. 256, No. 2, pp. 253-265.
- [48] Rahman, S. M., H. K. Jung, H. J. Park, J. M. Park, and C. I. Lee(2019), Synchronicity of climate driven regime shifts among the East Asian marginal sea waters and major fish species, Journal of Environmental Biology, Vol. 40, No. 5, pp. 948-961.
- [49] Rodionov, S. N.(2004), A sequential algorithm for testing climate regime shifts. Geophysical Research Letters, Vol. 31, No. 9, pp. 1-4.
- [50] Sakurai, Y. and H. Miyake(1994), Effects of environmental changes on reproductive process of walleye pollock in the subarctic ocean (Background of HUBEC program around Funka Bay as a modeling area), Umino Kenkyu, Vol. 3, No. 1994, pp. 303-308.
- [51] Wespestad, V. G.(1996), Importance of cannibalism in the population dynamics of walleye pollock, *Theragra chalcogramma*, NOAA Technical Report NMFS, Vol. 126, pp.212-216.
- [52] Wilson, M. T.(1996), Distribution and abundance of age-0 walleye pollock, *Theragra chalcogramma*, in the western Gulf of Alaska during September 1990, NOAA Technical Report NMFS 8, Vol. 126, pp. 11-24.
- [53] Worley, S. J., S. D. Woodruff, R. W. Reynolds, S. Lubker,

and N. Lott(2005), ICOADS release 2.1 data and products, Int. J. Climatol., Vol. 25, pp. 823-842.

- [54] 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, Vol. 11, No. 3, p. 276.
- [55] Yamamoto, J., M. Osato, and Y. Sakurai(2009), Does the extent of ice cover affect the fate of walleye pollock, PICES Scientific Report, Vol. 36, pp. 289-290.
- [56] Yoo, H. K., S. G. Byun, J. Yamamoto, and Y. Sakurai(2015), The Effect of Warmer Water Temperature of walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*) Larvae, Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety, Vol. 21, No. 4, pp. 339-346.

---

Received : 2020. 03. 11.

Revised : 2020. 04. 03.

Accepted : 2020. 04. 27.