



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

이학석사 학위논문

살오징어(*Todarodes pacificus*) 겨울산란군의
황해 유입 메커니즘 분석

Entrainment mechanism of *Todarodes pacificus*
winter cohort into the Yellow Sea



지도교수 이 호 진

2013년 8월

한국해양대학교 대학원

해양생명환경학과

송 지 영

본 논문을 송지영의 이학석사 학위논문으로 인준함.



2013년 6월 19일

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables	i
List of Figures	i
Abstract	iv
1. 서론	
2. 해수순환모델	
2.1 모델 영역	5
2.2 입력 자료	7
2.2.1 대기 입력 자료	7
2.2.2 초기값과 개방경계	8
3. 결과	
3.1 모델 검증	11
3.1.1 수온 검증	11
3.1.2 조석 검증	20
3.2 입자 추적 실험	27
3.2.1 산란장 추정	29
3.2.2 황해 유입 입자와 황해에서의 어획량과의 상관성	31
3.2.3 유생의 이동 경로	34
3.3 황해로의 유입패턴 분석	39
3.3.1 ER 유입 분석	39
3.3.2 산란장 역추정	41

4. 토의

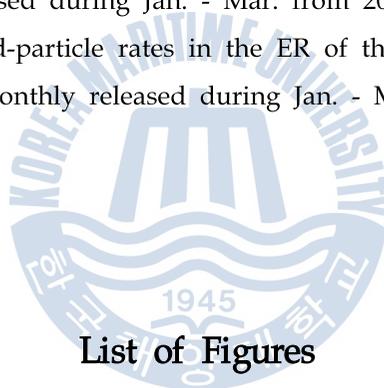
참고문헌 47

감사의 글 50



List of Tables

Table 1 Observed (OBS) and Calculated (CAL) M_2 , S_2 , K_1 and O_1 elevation amplitudes and phases for the sites shown in Fig. 15	22
Table 2 The number of particles released in the inferred monthly spawning area from day to day.	29
Table 3 The periods of the pass in (a) Korea Strait and (b) Tokara Strait, the particle mean periods, particle left rate and survival rate by temperature for 80 days after monthly released during Jan. - Mar. from 2005 to 2010.	40
Table 4 Monthly Entrained-particle rates in the ER of the left particles in the study area for 80 days after monthly released during Jan. - Mar. from 2005 to 2010.	40



List of Figures

Fig. 1 Bathymetry map and schematic of the ocean circulation in the East China Sea (ECS) and the Yellow Sea (YS).	3
Fig. 2 The bottom topography of the Yellow Sea.	6
Fig. 3 HYCOM-produced 2004 - 2011 annually-averaged initial sea-level, sea-surface temperature (in °C), sea-surface salinity (in PSU).	9
Fig. 4 Each pointed river mouth is located in the Yellow Sea and East China Sea.	10
Fig. 5 Model-derived 50m temperature (in °C) ; (A) February, (B) May, (C) August, (D) November.	13
Fig. 6 WOA01-produced 50m temperature (in °C) ; (A) February, (B) May, (C) ...	

August, (D) November.	14
Fig. 7 Model-derived 50m salinity (in PSU) ; (A) February, (B) May, (C) August, (D) November.	15
Fig. 8 WOA01-produced 50m salinity (in PSU) ; (A) February, (B) May, (C) August, (D) November.	16
Fig. 9 Location of the serial Oceanographic Observation Stations., NFRDI KOR. ·	17
Fig. 10 Model- derived 314line temperature (in °C) at six different perids in 2009. (A) 8 - 9 Feb, (B) 10 - 12 Apr, (C) 24 - 25 Jun, (D) 23 - 25 Aug, (E) 21 - 22 Oct (F) 23 - 24 Dec.	18
Fig. 11 Korea Oceangraphic data center produced 314line temperature (in °C) at six different perids in 2009. (A) 8 - 9 Feb, (B) 10 - 12 Apr, (C) 24 - 25 Jun, (D) 23 - 25 Aug, (E) 21 - 22 Oct (F) 23 - 24 Dec	19
Fig. 12 Calculated co-tidal (Solid lin) and co-range (broken line) charts of the M_2 , S_2 , K_1 and O_1 tides.	21
Fig. 13 Comparision between observed data and calculated amplitudes of the M_2 , S_2 , K_1 and O_1 tides.	24
Fig. 14 Comparision between observed data and calculated phases of the M_2 , S_2 , K_1 and O_1 tides.	25
Fig. 15 Location map for tidal elevation stations used for model validation.	26
Fig. 16 The horizontal distributions of the <i>Todarodes pacificus</i> larvae and temperature (°C) at 50m depth in the northern East China Sea (Kim et al. 2011).	28
Fig. 17 Model-derived horizontal distributions at 50m depth in the northern East China Sea.	28
Fig. 18 Inferred spawning area in 2005. After 2005, the similar pattern appeared. ·	30
Fig. 19 The hypothesized space for <i>Todarodes pacificus</i> larvae to the moving into the Yellow Sea.	32
Fig. 20 Yearly catch of squids in the Yellow Sea in 1970-2010 (Choi et al.2010). ·	32
Fig. 21 Time series of fluctuations of the number of entrained particles from 60 days to 120 days after release.	33
Fig. 22 Three subareas used in the study.	35
Fig. 23 Temperal changes of particle trajectories at each release site calculated by model in 2005. After 2005, the similar pattern was simulated. Different colors	

indicate the released term (days). 36

Fig. 24 Temporal changes of particles trajectories simulated by model for 60, 90 and 120 days in 2005. After 2005, the similar pattern was simulated. Different colors indicate the released term (days) in the subarea A (Fig. 22). 37

Fig. 25 Hypothesized mechanism occurring in years with unfavourable spawning area distribution pattern as suggested by Rosa et al. (2011). 38

Fig. 26 Initial spawning area of entrained-particles in the ER from Feb. to Mar during the study periods. 42

Fig. 27 Spatial distribution of surface Temperature ($^{\circ}\text{C}$) produced satellite ocean lab., NFRDI KOR in the months Mar. - May from the 2007 to the 2009 . Different colors indicate the sea surface temperature. 45

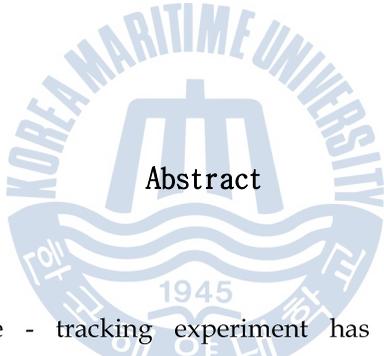
Fig. 28 Same as Fig. 26, except for surface Chl-a concentration (mg/m^3) 46



Entrainment mechanism of *Todarodes pacificus* winter cohort into the Yellow Sea

Ji Young Song

*Division of Marine Environment and Bioscience,
Graduate School of Korea Maritime University, Busan, 606-791, Korea*



Abstract

A Lagrangian - particle - tracking experiment has been conducted by using Regional Ocean Modeling System (ROMS) to understand entrainment mechanism of *Todarodes pacificus* winter cohort into the Yellow Sea from 2005 to 2010.

As a numerical experiment result, the transport process in the Yellow and East China Seas was affected by different pathway between the Kuroshio and Northeastward Kuroshio Branch (NKB). However, the particles released in the southwest Kyushu passed through the Entrainment Region (ER) more than those in the other regions.

The backtracked spawning area of the entrained particles in the ER covered 30°-33°N and 126° ~ 128°E, southwest Kyushu.

The results showed the different pattern with the hypothesized entrainment mechanism into the Yellow Sea as suggested by Rosa et al. (2011), which suggested

that the environment of the *T.pacificus* spawning area can influence the catch of the *T.pacificus* and *T.pacificus* eggs and larvae moved to the Yellow Sea by Taiwan Warm current during unfavorable spawning area. Also, the annual variability of the observed cohort in the Yellow Sea presented the positive correlation with those of the number of entrained particles into the ER according to the advection and survival process by the low temperature except in 2007.

Therefore, it is important the annual variability of the transport and survival process by the low temperature and environment of the southwest Kyushu for the catch of the Yellow Sea of the *T.pacificus*.



제 1 장 서론

살오징어는 북서태평양에 광범위하게 분포하는 어종이며, 우리나라와 일본의 중요한 수산자원이다. 또한 광온성 생물로 서식수온은 4 - 27 °C로 알려져 있으며, 주 서식수층은 표층으로부터 약 200m 정도이다. 수명은 약 1년이고 산란 후 사망한다 (Roper et al. 1969; Voss, 1977). 산란은 동중국해와 동해남부에서 15 - 23 °C 수온범위의 대륙붕이나 대륙사면 (100 - 500 m) 상층부 지역에서 이루어진다. 어미개체는 반부유성 난괴를 방출하며, 난괴는 밀도약층 내에 분포하는 것으로 알려져 있다 (Sakurai, 2006). 난괴는 수온 18 - 19 °C 정도에서 5일후에 부화하며 부화 후 유생은 표층으로 떠올랐다가 시간이 경과함에 따라 서식 수심이 조금씩 깊어져 수심 25 - 50 m에서 주로 분포한다 (Bower and Sakurai, 1996).

연중 산란하는 것으로 알려진 살오징어는 산란이 집중되는 계절에 따라 여름 (5 - 8월), 가을 (9 - 12월), 겨울 (1 - 4월) 산란군의 세 개의 계군으로 나뉜다 (Murata, 1989; Kim and Kang, 1995). 하지만 자원량의 대부분이 가을산란군과 겨울산란군으로 구성되며 현재까지의 연구결과들을 종합해 보면 겨울산란군의 자원량이 가장 많다 (Araya, 1967; Kasahara, 1978; Okutani, 1983; Murata, 1989).

가을산란군은 산란장이 큐슈 남쪽부터 대만해협을 지나 일본 연안까지이며, 9월에서 12월에 산란을 하고 부화된 유생들은 쓰시마 난류에 의해 북쪽으로 수송되면서 점차 성장하여 겨울에 홋카이도에 도달한다. 가을산란군은 홋카이도 서쪽을 주 섭이장으로 하며 산란시기가 오면 남쪽으로 산란회유한다. Hamabe (1965)와 Kasahara (1978)에 따르면 추계에 발생한 가을 산란군은 동해에 주로 분포한다고 보고하였다.

겨울 산란군의 산란장은 큐슈에서 타이완까지의 동중국해에 분포하고, 1월에서 4월 사이에 산란 후 대부분이 쿠로시오를 따라 북상 회유하며 쿠로시오 전선을 주 섭이장으로 하고 늦여름과 초가을 사이에 산란을 위해 다시 회유한다 (McGurk, 1987; Frank et al. 1993; Stabeno et al. 1996; Nakara. 1996; Townsend and Pettigrew, 1996)

2000년대 들어 황해에서의 오징어 어획량은 급격히 증가하는 것으로 보고되고 있는데 이러한 어황변동은 살오징어 어장으로써 황해의 중요성을 새롭게 인식하는 계기가

되고 있다. 황해에서 어획된 살오징어는 겨울 산란군이 우세하며, 살오징어 어장은 6월에 형성되기 시작하여 8-9월에 성어를 이룬다 (Kim et al. 1984). 그 후 산란회유하여 12월부터 다시 어장이 형성되며, 매년의 어획량 변동이 큰 편이다. 국내에서의 황해에서 서식하는 살오징어에 관한 연구는 그동안 동해에 비해 미비했고 주로 성어자원을 대상으로 한 어획과 해황특성의 관계에 관한 연구들이 대부분이었다. 하지만 초기생활사 단계의 생존과정에 따른 자원으로의 가입량은 어획량과 연관된다. 따라서 황해에서 어획되는 살오징어의 가입기작 연구는 동계 동중국해에서 형성되는 산란장으로부터 해류에 의해 황해로 유입되는 과정에 관한 연구가 필수적이다. 살오징어 유생의 이동패턴에 관한 기존연구로는 Rosa et al. (2011)가 과거 한랭기에 전체 어획량은 감소하였지만 이 시기에 서해의 어획비율은 증가함에 따라 한랭기에는 해류에 의해 살오징어 회유 경로가 변했을 것으로 추정하였고, 藤井康之 (2004)는 살오징어 가을 산란군을 해류에 의한 입자추적실험을 하였을 때 유생의 분포를 관측자료와 유사하게 계산할수 있었다.

본 연구지역에서의 주요 해류는 Isobe et al. (2008)에 의해 제시된 쿠로시오 (Kuroshio), 연안으로 유입된 쿠로시오 (The Onshore Kuroshio Intrusion, 이하 OKI), 북동방향의 쿠로시오 지류 (The Northeastward Kuroshio Branch, 이하 NKB), 북향류 (The Northward Current, 이하 NC), 대만난류 (The Taiwan Warm Current, 이하 TWC), 대마난류 (The Tsushima Warm Current, 이하 TC), 북향 쿠로시오지류 (The Northward Kuroshio Branch, 이하 NB)등이 있다 (Fig. 1). 그러나 현재까지 역학과정에 따라 황해로 유입되는 살오징어 알과 유생의 수송과정에 관한 연구는 전무한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 Isobe et al. (2008)에 의해 정의된 흐름에 따른 살오징어 겨울 산란군의 수송과정과 황해로의 유입과정을 이해하기 위하여 3차원 해수순환 모델을 이용하여 황해의 해양 순환을 재현하고 입자 추적 실험을 통해 겨울산란군 유생의 수송과정을 모의한다.

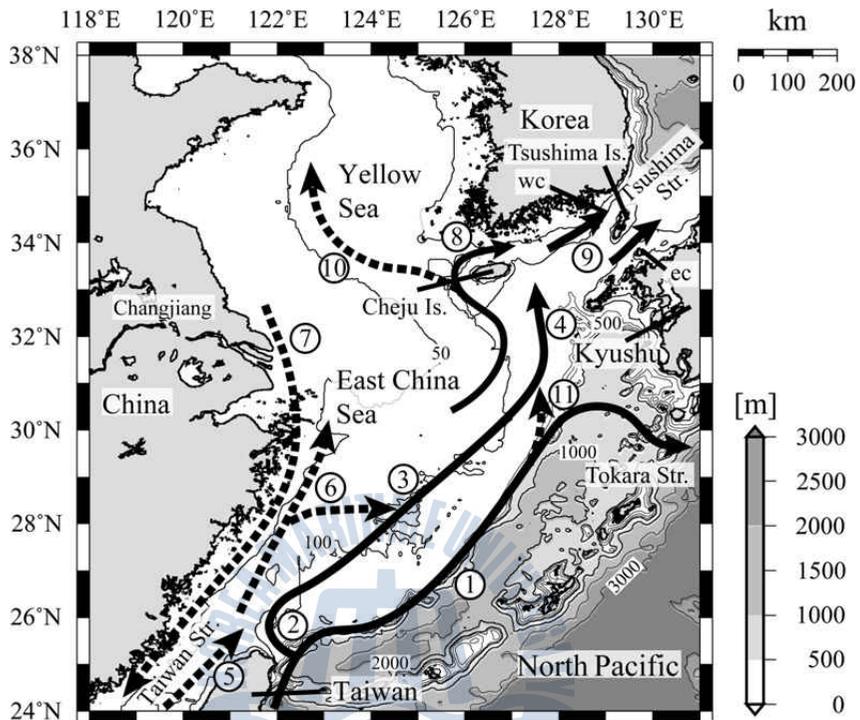


Fig. 2 Bathymetry map and schematic of the ocean circulation in the East China Sea (ECS) and the Yellow Sea (YS). Solid and dashed arrows labeled 1 to 11 represent major surface currents in the ECS and the YS, mainly with reference to [Isobe \(2008\)](#). These currents are termed in the present study as follows: “1” the Kuroshio, “2” the onshore Kuroshio intrusion (OKI), “3” the northeastward Kuroshio branch (NKB), “4” the northward current (NC), “5” the Taiwan Strait Warm Current, “6” the Taiwan Warm Current (TWC), “7” the China Coastal Current, “8” the Cheju Warm Current, “9” the Tsushima Warm Current, “10” the Yellow Sea Warm Current, and “11” the northward Kuroshio branch (TC). The surface currents shown by the solid arrows are regarded as persistent, referred to [Isobe et al. \(2008\)](#) ([Takahash et al. 2013](#)).

제 2 장 해수순환모델

본 모델에서 사용한 해수유동모델은 ROMS (Regional Ocean Modeling System) Version 3.6이다. ROMS는 정수압근사 (hydrostatic assumptions)와 Boussinesq를 이용하여 원시방정식 (primitive equations)을 계산하는 3차원 자유수면 terrain-following 수치모델이다 .

연구 영역의 육지와 바다의 경계가 되는 곳에서는 육지와 맞닿은 격자의 수평방향 유속이 옆격자의 유속과 같은 상태로 고려되는 free-slip을 설정하였다. σ -coordinate의 장점은 수온약층과 같은 어떤 특정지역이나 경계부분을 조밀하게 격자화함으로써 지형의 특징을 잘 나타낼수 있다. 그러나 연안같이 경사가 급해지는 지역이나, 지형이 많이 변하는 지역에서 bottom stress로 보기 어려운 horizontal pressure gradient error가 발생하기 때문에 이 에러를 줄이기 위해 수심변화에 대한 보정을 하였다.

수평좌표계 (Horizontal curvilinear coordinates)는 직교 곡선 좌표계 (Orthogonal - curvilinear coordinate)를 이용한다. 이 좌표계의 특성으로 수평적인 거리가 달라질 수 있으며, 따라서 Smagorinsky 방법을 이용하여 지형특성에 따른 수평확산계수가 유도되도록 하였다.

혼합층의 분포와 연관된 수직 난류 점성 계수는 Mellor/Yamada Level - 2.5 closure 을 사용하였다. 열의 이류와 대기와 해양사이의 열교환은 단과복사, 장파복사, 현열, 잠열의 요소를 이용하는 Fairall et al. (1996)의 Bulk 계산식이 사용되었다.

연구해역의 남쪽과 동쪽경계는 황해 및 동중국해역내의 해류에 직접적인 영향을 미치는 쿠로시오 난류와 대만난류가 흐르는 지역으로 개방경계로 설정했다. 본 연구에서는 개방 경계에서 외력으로 조석을 넣어주기 위해 free-surface는 Chapman (1985) 방법을 이용하였고, 2차원 유속은 Flather (1976) 타입의 Radiation 조건을 이용하였다.

3차원 유속 및 수온, 염분은 Radiation 조건을 이용하였고 수온,염분은 30일 간격의 nudging을 포함한다. 시간 차분방법으로는 barotropic fast와 baroclinic slow mode로 나누어 계산하는 split-explicit time stepping scheme을 사용하였다.

2.1 모델 영역

모델 영역인 황·동중국해 해역은 북위 23.3 ~ 42.5도, 동경 117 ~ 130.9도로 서태평양의 북서부에 위치해 있는 연해 (Marginal Sea) 로써 중국과 한국에 의해 둘러싸여 있는 반폐쇄 해역이다. 황해는 넓은 대륙붕으로 이뤄진 해역으로 간빙기 때에는 바다였고 빙하기 때에는 거대한 평원이었던 지역이다. 최대수심은 대략 100 m이고 평균수심은 44 m인 천해역이며, 전체 면적은 대략 40만 km²이다 (Fig 2).

북쪽으로 남부 황해해역과 접해있는 동중국해는 남쪽으로는 타이완, 난세이 제도, 큐슈에 의해 구분되고, 북쪽으로는 제주도과 양쯔강 하구를 잇는 선에 의해 다른 해역들과 구분된다. 중국 대륙쪽은 60 ~ 200 m 깊이의 대륙붕이 넓게 펼쳐져 있고, 대만 타이페이 (Taipei)와 일본 고도 열도 (Goto Island)를 연결한 선을 따라 수심 500 m 인 대륙사면이 발달해 있다. 중국 대륙 연안수, 대만 난류와 쿠로시오의 외해수가 동중국해의 50 ~ 100 m에서 만나 전선을 이루는데, 일반적으로 중국 연안수의 육상기원 물질과 외해수에서 유입되는 물질들은 이 전선에서 수렴하는 경향이 있고, 이런 특성으로 회유종들에게 좋은 산란장 및 서식지가 되는 곳이다.

본 연구에서 사용한 수심자료는 NGDC (National Geophysical Data Center)에서 제공하는 ETOPO1 자료이며, 최소수심은 10 m, 최대 수심은 2000 m로 지정하였고, 수평 격자는 138 × 230의 격자로 1/10° (약 10km)의 격자간격으로 구성되었으며, 연직 격자수는 42개로 구성된다. 유한 차분한 해역에서의 X, Y 축으로의 최소 길이는 대략 8 Km, 최대길이는 10.2 km이며, 연직 방향으로 최소 길이는 0.19 m, 최대 길이는 170 m로 설정하였다.

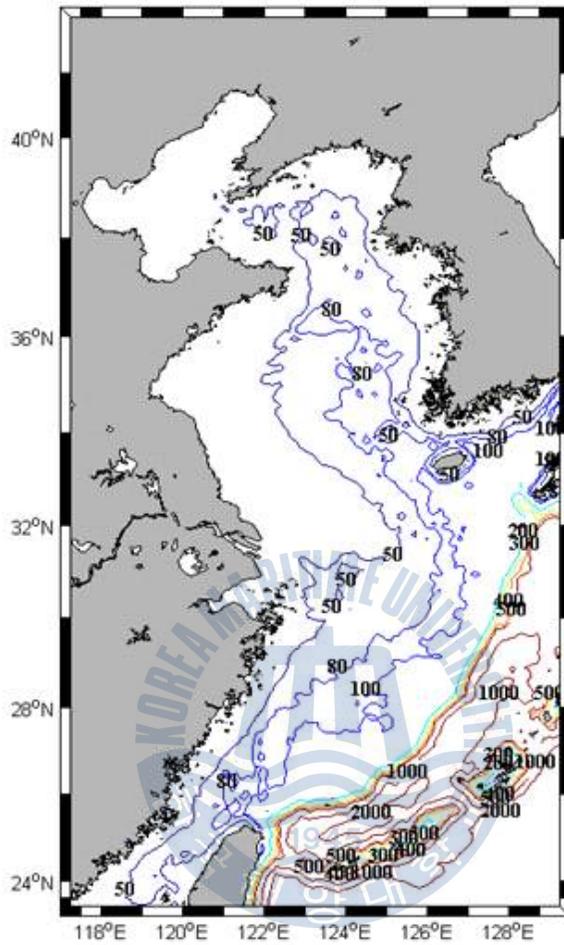


Fig. 3 The bottom topography of the Yellow Sea

2.2 입력 자료

2.2.1 대기 입력 자료

대기 상태의 변화는 해수 유동 경향에 큰 영향을 미친다. 본 연구에서는 대기 입력자료로 2004년부터 2011년까지 12시간 간격, 해상도 0.75° ECMWF (European Centre for Medium - Range Weather Forecasts)을 사용하였다. ECMWF의 분석자료는 모델결과와 단기간 관측 자료를 사용하여 만들어진 자료로써 바람장, 기온, 대기압, 이슬점 온도가 사용되었다. 기온과 이슬점 온도는 상대습도를 유도하기 위한 변수로 사용되었고(2.1 ~ 2.1), (2.3)은 상대습도 (RH)를 구하는 식을 나타낸다.

$$e = 6.11 \times 10^{\frac{7.5 \times T_d}{237.7 + T_d}} \quad (2.1)$$

$$e_s = 6.11 \times 10^{\frac{7.5 \times T}{237.7 + T}} \quad (2.2)$$

$$RH = \frac{e}{e_s} \times 100 \quad (2.3)$$

e 는 포화 증기압이고, e_s 는 증기압을 나타낸다. T_d 는 이슬점 온도, T 는 기온이며, 단위는 섭씨 온도이다. RH는 상대습도이고 단위는 퍼센트(%)이다. 재분석자료는 분석 자료를 이용한 예측 모델결과로 현재예측자료와 누적예측자료로 구분된다. 재분석 자료는 누적 예측 자료만 이용하였고 사용 변수로는 장파 복사와 입사량 값에 해수면 알베도가 반영되어 있는 단파복사, 그리고 강수 비율값이 쓰였다. 각 변수들의 내삽방법은 텐션을 0.01로 지정함으로써 0.75° 자료를 0.1°로 내삽할 때 지형경계 부분에서 생길수 있는 오류 값을 줄이고자 했다 (Smith et al. 1990).

본 연구에서는 모델 안정화를 위해 대기입력 자료들을 2004년부터 2011년도까지 월 평균하여 8년간 spin-up한 후, 2004년부터 2010년까지 각각의 변수들을 12시간 간격으로 넣어주었다.

2.2.2 초기값과 개방경계

본 연구에서는 초기변수값의 유속값은 0으로 일정하게 주었고, 수온, 염분, 해면고도 값은 2004년부터 2011년까지 일간격의 $1/12^\circ$ HYCOM (HYbrid Coordinate Ocean Model) 자료를 이용하여 만들었다. 초기 수온값은 북에서 남으로 갈수록 수온이 높게 나타나고, 염분 값은 발해와 황·동중국 해역의 강유량이 포함되어 있다. 연직 고도는 지형류를 유발하여 유동에 매우 큰 영향을 미치는데 남쪽으로 갈수록 높게 나타남에 따라 쿠로시오가 지속적으로 잘 형성될수 있도록 하였다 (Fig. 3).

연구 해역에서는 약 1200 km^3 정도의 담수가 유입되는 곳이다. 그 중 양자강은 세계에서 5번째로 유량이 많은 강으로 연간 유출량이 $35000 \text{ m}^3/\text{s}$ 정도이고, 연구해역에서 담수유입의 79%를 차지한다 (柳, 1994). 양자강 이외에도 70여개의 크고 작은 하천이 있는데 본 모델에서는 양자강을 포함한 11 지역의 강을 고려하였다 (Fig. 4). 유출량 자료중 양자강을 제외한 강들은 RivDIS v.11 (The Global River Discharge Database), GRDC (Global Runoff Data Centre), 국토해양부 한강 홍수 통제소의 월평균 값을 이용하였고, 양자강은 www.cjh.com.cn의 일자료를 1998년부터 2011년도까지 월평균하여 사용하였다.

개방경계에서의 입력변수에는 수온, 염분, 유속, 해면고도 값이 필요하다. spin-up 할 때, 각 변수 값들을 2004년부터 2011년도까지의 HYCOM 자료를 월평균 하여 이용하였고, 2004년부터 2010년까지 hindcast 모델을 수행할 때는 하루 간격으로 넣어주었다. 개방경계에서 이용되는 조석 자료는 TOPEX/Poseidon 인공위성의 관측 자료를 이용한 전 지구 모델 (Oregon global model) 결과인 TPX07 1/4도 자료이다. 본 연구에서는 M_2 , S_2 , K_1 , O_1 , N_2 , K_2 , P_1 , Q_1 의 8대 분조와 장주기 분조인 Mm, Mf을 고려하여, TPX07자료의 조석 장·단축 값과 조석 엘리베이션을 모델 영역에 맞게 내삽하여 사용하였다.

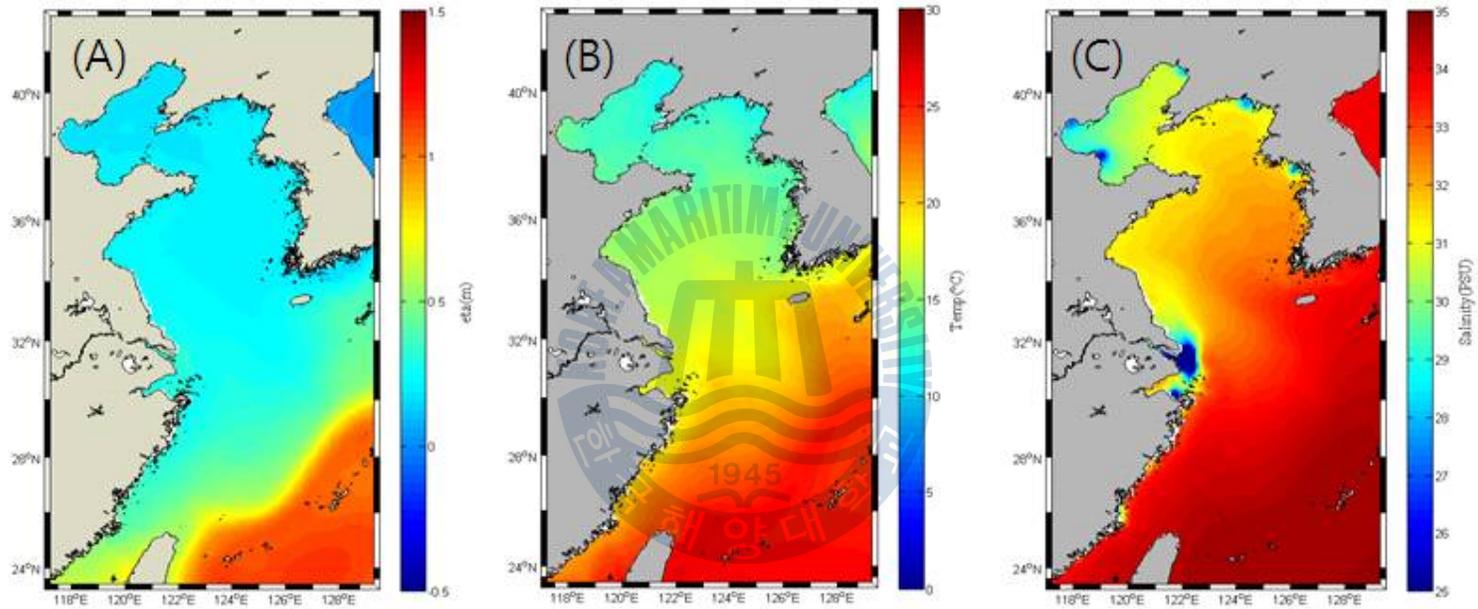


Fig. 4 HYCOM-produced 2004 - 2011 annually-averaged initial (A) sea-level, (B) sea-surface temperature (in $^{\circ}\text{C}$), (C) sea-surface salinity (in PSU).

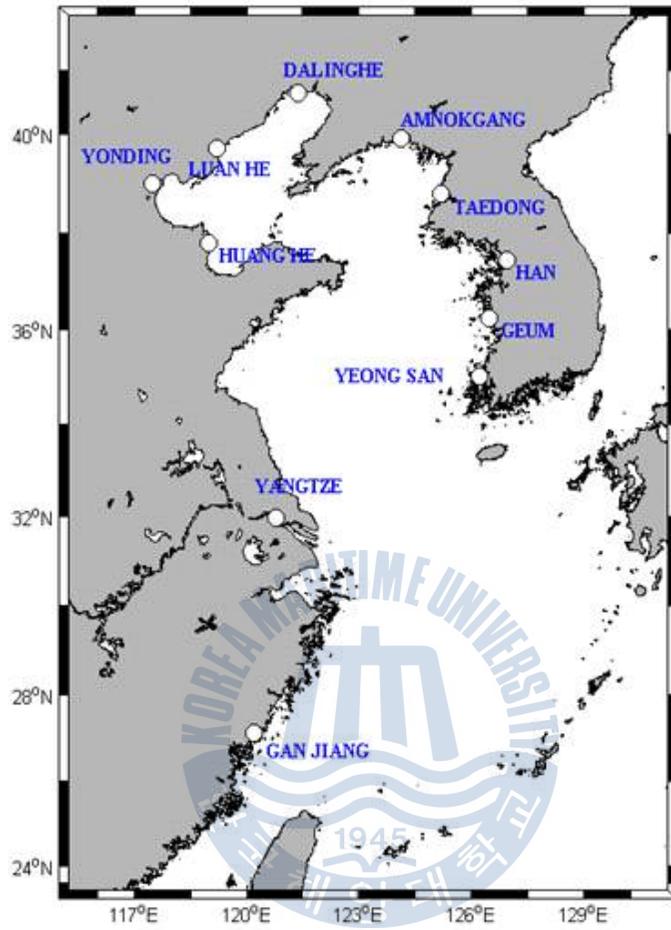


Fig. 5 Each pointed river mouth is located in the Yellow Sea and East China Sea.

제 3 장 결과

3.1 모델 검증

3.1.1 수온 검증

수온은 유생 생존률의 주요 요소이다. 그리고 해양에서의 수온과 염분은 해양의 밀도장 형성에 매우 큰 영향을 미친다. 따라서 본 연구에서는 표층수온과 염분 값이 관측값에 크게 벗어나지 않도록 (3.1) 식과 (3.2)식을 이용하여 nudging을 해주었다.

$$Q_{model} = Q + dQdSST \times (T_{model} - SST) \quad (3.1)$$

$$S_{model} = -\frac{1}{t} \times Hz \times (S_{model} - SSS) \quad (3.2)$$

SSS와 SST는 관측값으로 본 연구에서는 2005년부터 2010년까지 국립수산과학원 위성해양 연구실에서 직수신한 1 km 해상도의 NOAA/AVHRR 위성 월평균 수온자료 값과 25 km 해상도의 WOA01 염분값을 사용하였다. (3.2) 식의 t는 nudging time, Hz는 rho-point에서의 연직 높이, S_{model} 은 염분 모델 결과를 나타낸다. (3.1) 식의 T_{model} 은 수온 모델결과, Q는 모델 net heat flux를 나타내며, dQdSST는 NCEP (National Center for Environmental Prediction)의 1945년부터 1989년까지의 0.5°해상도인 대기밀도, 수온, 염분, 비습등을 이용하여 계산된 값으로 관측과 모델의 차이만큼 net heat flux를 기후값으로 유도한다.

황·동중국해 모델의 재현성 확인은 해상도 1/4° WOA01 50 m 월평균 수온 염분장과 한국해양자료센터의 정선해양관측자료 중 유생의 분포 영역인 제주도 남서쪽에 위치한 314line의 2, 4, 6, 8, 10, 12 월 수온연직분포를 이용하였다 (Fig 9). 모델에서 유도된 겨울, 봄철에는 5 ~ 25 °C의 수온이 분포하며, 여름철은 10 °C 이하의 저층 냉수가 존재하고, 가을철에는 15 ~ 25 °C의 분포패턴이 보이고, 쿠로시오의 경우 대만 동쪽과 큐슈 서쪽 사이에서 연중 20 °C 이상의 고온이 분포했다 (Fig. 5). 계절별 수온 변동 패턴 또한 전 계절에 걸쳐 WOA01에서 유사한 분포를 보인다 (Fig. 6). 같은 수심에서의 각 계절별 염분 분포는 수온처럼 계절 변동이 나타나지는 않았지만 동중국해역에서의

염분이 황해에 비해 연중 높게 나타났고 등염분선 분포가 WOA01과 비슷했다 (Fig. 7 ~ 8).

연직 수온 검증은 2009년 자료를 사용하였다 (Fig. 11). 2월과 4월의 모델 결과는 연직적으로 잘 혼합되어 있는 상태였고, 범위는 14 ~ 17 °C로 관측값과 유사하게 나타났다. 6 ~ 8월달에는 2 ~ 4월 연직분포와 달리 수온약층이 존재하였고 수온약층 깊이는 20 ~ 40 m 정도로 관측값과 매우 유사하게 나타났다. 8월과 10월에 125 ~ 126° 사이의 수온분포가 관측에 비해 높게 나타났지만 본 연구에서 알아보하고자 하는 해류에 따른 겨울 산란군 유생의 이동이 8월 이후의 유동장 영향을 직접적으로 받지 않는다고 판단됨에 따라 연구 시기에는 직접적인 영향을 미치지 않는 것으로 보았다 (Fig. 10).



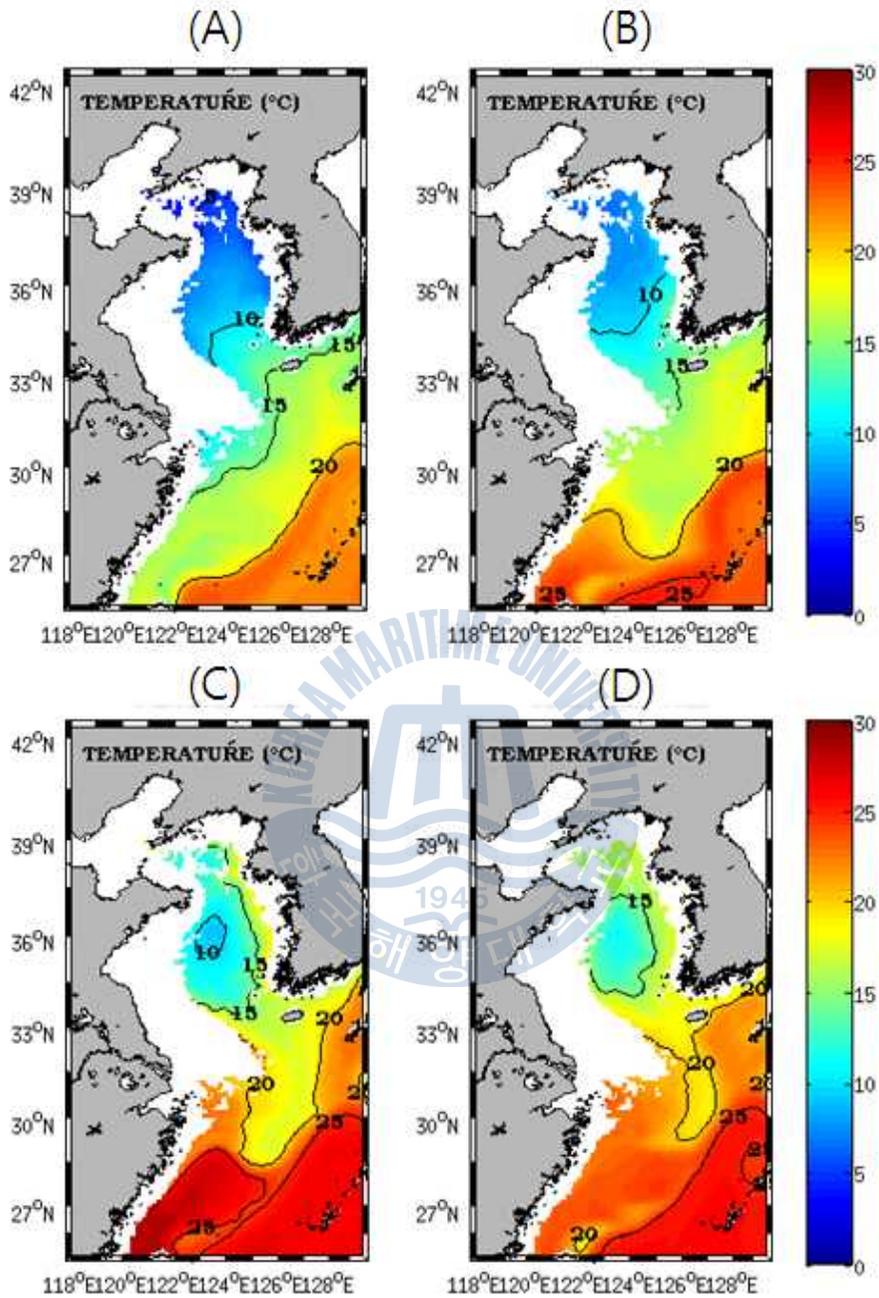


Fig. 5 Model-derived 50m temperature (in °C). (A) February, (B) May, (C) August, (D) November

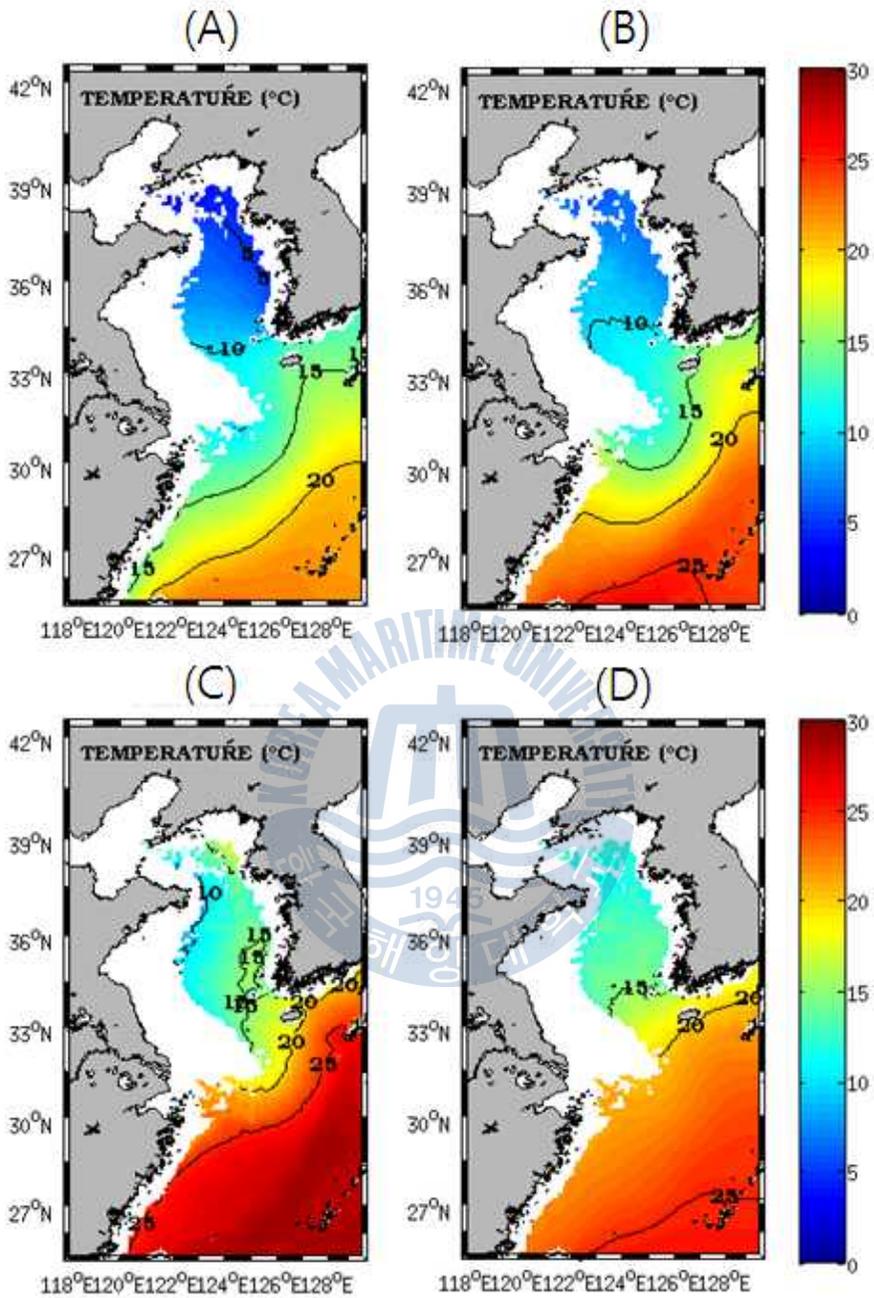


Fig. 6 WOA01-produced 50m temperature (in °C). (A) February, (B) May, (C) August, (D) November

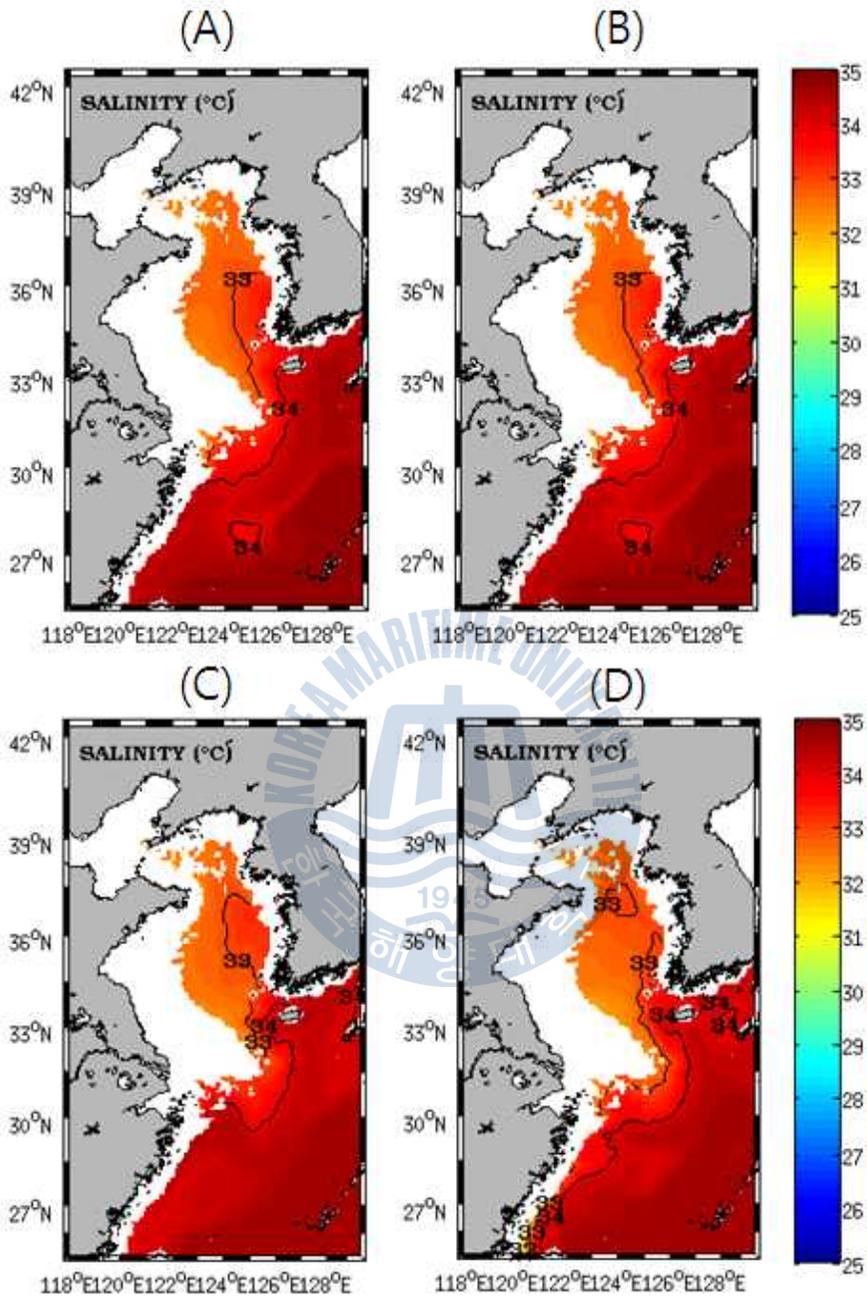


Fig. 7 Model-derived 50m salinity (in PSU). (A) February, (B) May, (C) August, (D) November

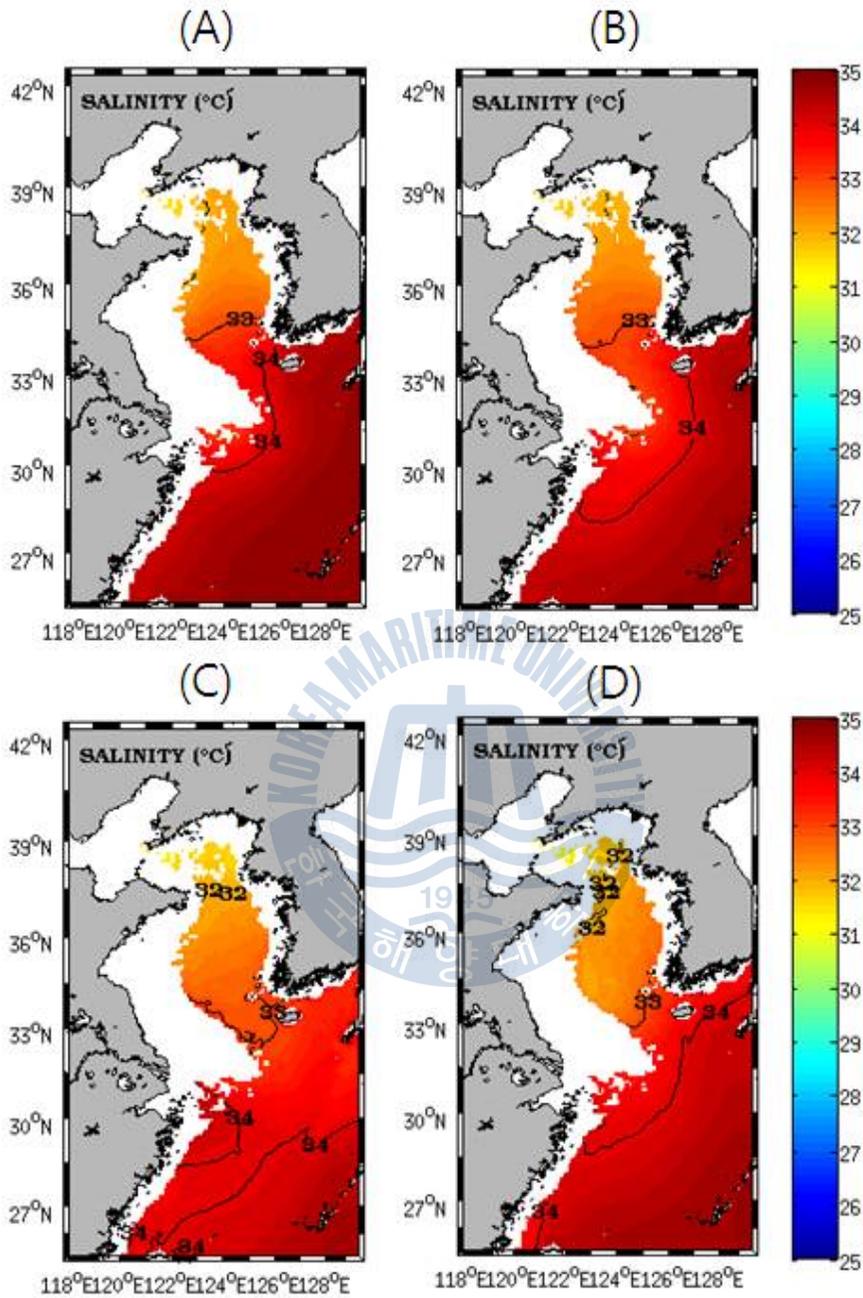


Fig. 8 WOA01-produced 50m salinity (in PSU). (A) February, (B) May, (C) August, (D) November



Fig. 9 Location of the serial Oceanographic Observation Stations, NFRDI KOR

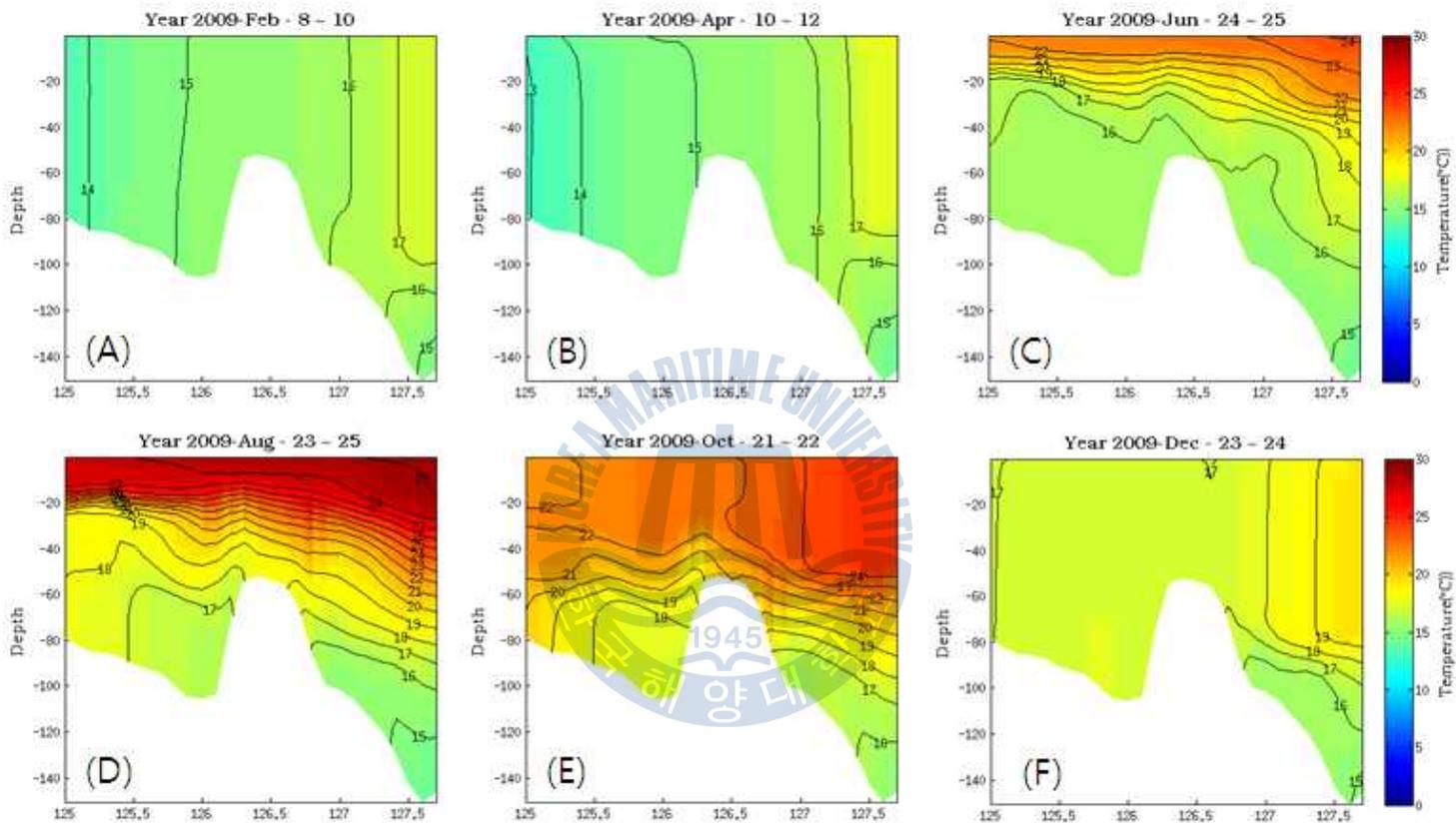


Fig. 10 Model- derived 314line temperature (in °C) at six different periods in 2009. (A) 8 - 9 Feb, (B) 10 - 12 Apr, (C) 24 - 25 Jun, (D) 23 - 25 Aug, (E) 21 - 22 Oct (F) 23 - 24 Dec.

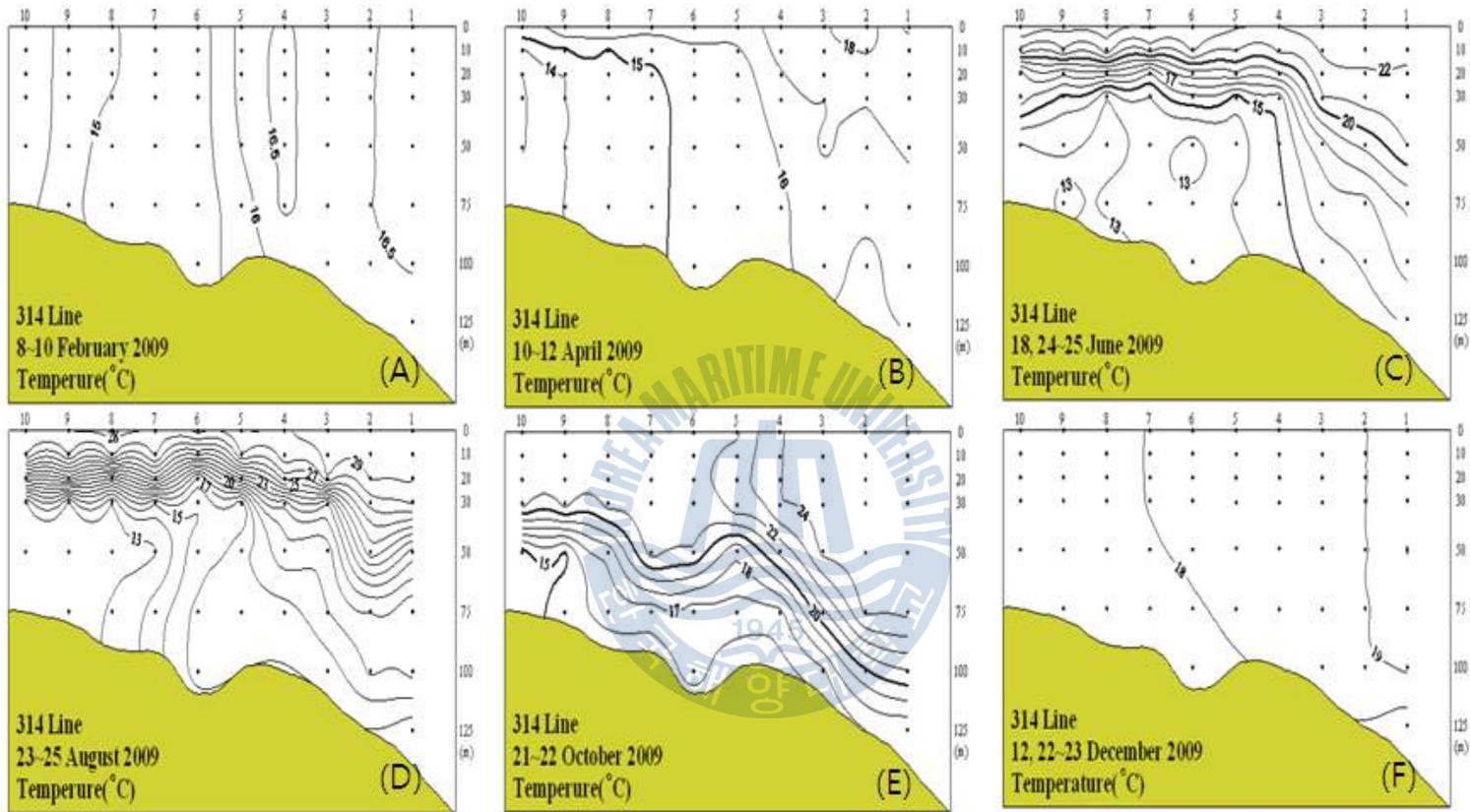


Fig. 11 Korea Oceanographic data center , NFRDI KOR produced 314line temperature (in °C) at six different periods in 2009. (A) 8 - 9 Feb, (B) 10 - 12 Apr, (C) 24 - 25 Jun, (D) 23 - 25 Aug, (E) 21 - 22 Oct (F) 23 - 24 Dec.

3.1.2 조석 검증

본 연구해역에서의 유동장은 조류 (Tidal current)와 해류 (Ocean current)가 탁월한 것으로 보고됨에 따라 (Ogura, 1933; Nishida, 1980; Larsen et al. 1985; Fang, 1986), 모델에서 계산된 조석을 검증하기 위해 국립해양조사원 (<http://mdc.nori.go.kr/>)의 1시간 간격조위 관측자료를 비교하였다. Figure 15에서 나타난 14개의 관측지점과 124.1°E, 24.306°N에 있는 ISHIGAKI 검조소에서 관측된 조위 및 위상을 모델 결과와 비교하여 Figure 13과 Figure 14 그리고 Table 1에 나타내었다. 분석된 진폭의 단위는 cm이고, 위상은 Greenwich 자오선을 기준으로 분석하였다. 실측 조위와 예측 조위사이의 상관성과 신뢰성을 판단할 수 있는 상관계수 (R)를 살펴보면 M_2 , S_2 , K_1 , O_1 이 각각 0.9464, 0.9652, 0.7527, 0.1881으로 O_1 을 제외하고 재현성 있는 결과를 보였고, 반일주조 성분인 일주조 성분보다 양호한 상관성을 나타내었다. 위상예측에 있어서는 M_2 , S_2 , K_1 과 O_1 에서 0.9332, 0.9139, 0.8604, 와 0.8714로서 조위 예측의 결과보다 양호하게 계산되었다. 특히 O_1 의 위상 상관계수값은 조위 상관계수값과 달리 높은 값을 나타내었다. 위상 분석 결과 목포에서 전체적으로 계산값이 관측값보다 적게 시뮬레이션 되어 잘 맞지 않았고, 전체적인 분석결과는 M_2 계산값이 관측값과 가장 부합하는 양상을 나타내었다. 검증지점의 수, 모델의 영역과 격자크기, 고려된 분조의 수 차이로 절대적인 상호비교는 힘들지만, M_2 분조의 조위와 위상에 있어서 Choi (1980)는 각각 위도 10%와 위상 10° 범위, Lee et al. (2002)은 16.4 cm 와 19.5°, Kang et al. (1988)은 9.7 cm 4.5°의 오차가 존재 하였다. 본 연구 결과는 목포를 제외하고 대부분의 검조소에서 조위와 위상의 상대오차가 10% 미만으로 낮게 나와 조석이 잘 재현되는 것으로 판단하였다.

tidal chart는 일부지역에서 다소의 차이를 보였지만 Nishida (1980), Bao et al. (2001)과 Lee et al. (2002)등의 결과와 유사하였다. M_2 의 등조시선과 등조차선은 Nishida (1980)에서의 관측값과 매우 일치하였다. S_2 의 경우 등조시선의 4개의 무조점의 위치는 잘 재현되었지만, 등조차선인 전 해역에서 높게 계산되었고, K_1 과 O_1 도 2개의 무조점의 위치가 기존 결과와 유사하였다. 하지만 일주조의 등조차선은 관측값보다 낮게 재현되었고, O_1 에서는 차이가 다소 나타났다 (Fig. 12). 관측과 모델 결과의 오차는 관측점의 수평적 위치 및 측정 수층과 모델 영역 상에서의 바닥 마찰계수 값과 해상도에 의해 달라진다 (Lee et al. 2002). 따라서, 이러한 일부 차이는 σ -좌표 특성에 의해 실제 수심과 차이가 발생했고, 목포와 같이 섬이 많은 지역을 완벽히 재현할 수 없었기 때문으로 사료된다.

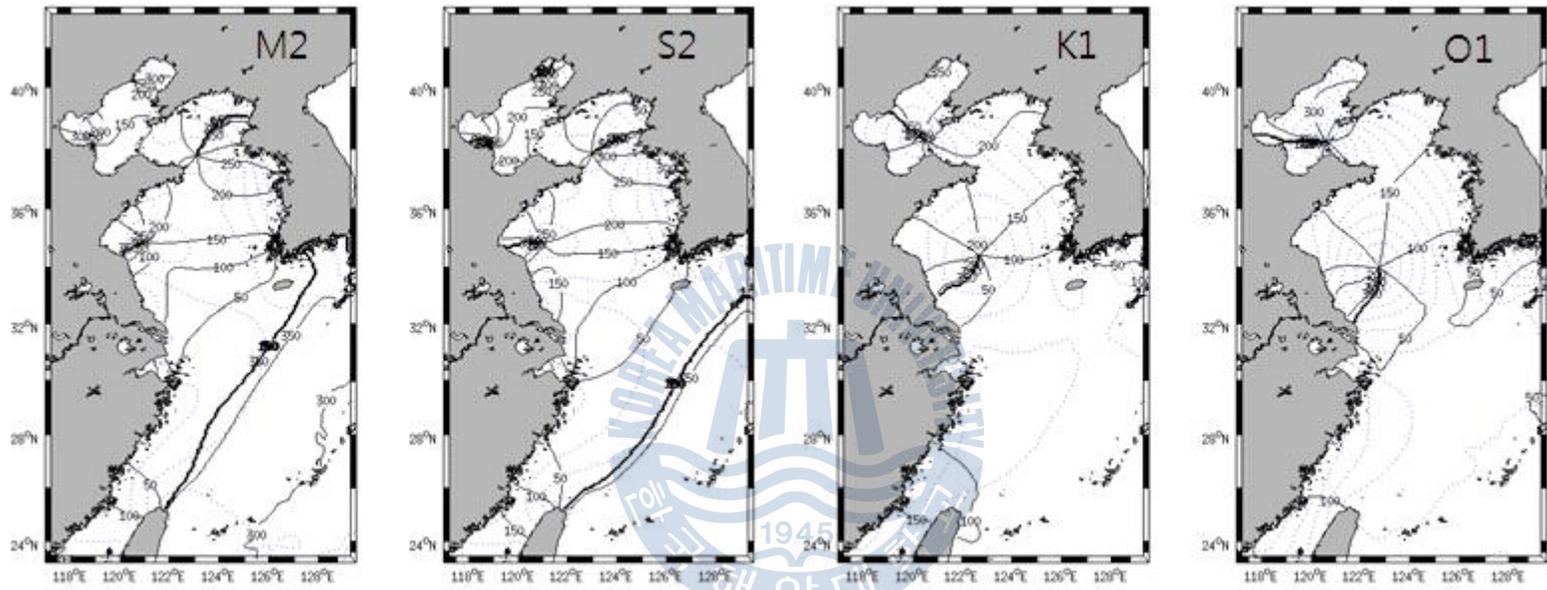


Fig. 12 Calculated co-tidal (Solid line) and co-range (broken line) charts of the M₂, S₂, K₁ and O₁ tides.

Table 1 Observed (OBS) and Calculated (CAL) the M_2 , S_2 , K_1 and O_1 elevation amplitudes and phases for the sites shown in Fig. 15

	M2 Amp		M2 Pha		S2 Amp		S2 Pha		K1 Amp		K1 Pha		O1 Amp		O1 Pha	
	model	obs														
안흥 AN	240.5	213.3	192.7	199.5	118.2	100.4	237.0	253.2	28.23	35.18	132.0	150.4	17.85	24.58	135.7	131.6
보령 BO	253.6	210.2	186.9	196.9	125.4	99.61	231.3	248.1	28.36	45.10	128.8	161.0	17.94	12.16	132.8	133.3
군산 GU	235.2	223.3	169.2	184.6	116.4	104.2	212.6	237.5	27.01	34.88	120.2	143.4	17.40	24.23	124.6	124.1
영광 YE	216.3	188.0	159.3	168.2	106.7	68.78	201.9	213.3	26.03	25.90	115.3	131.2	17.09	22.29	119.8	136.4
목포 MOK	160.6	147.9	44.04	133.1	91.20	62.34	79.53	182.9	25.63	30.15	58.09	114.3	16.14	22.11	62.95	96.99
추자 도 CH	108.6	92.24	46.27	65.13	63.05	44.83	81.59	98.13	21.48	26.63	69.87	84.06	13.87	18.53	74.94	65.1
위도 WI	216.4	198.3	164.1	172.4	98.46	96.02	197.6	221.3	25.27	32.36	124.4	136.1	15.31	24.45	103.7	114.5
모슬 포 MO	111.6	78.72	26.03	43.07	64.59	40.47	62.27	76.41	22.36	25.12	63.42	80.98	14.77	17.52	68.07	62.4
서귀 포 SE	115.7	78.54	5.14	23.4	66.69	42.90	41.1	57.59	21.43	24.82	51.65	73.7	13.79	17.24	55.54	54.2
인천 IN	364.9	285.6	256.8	227.2	143.8	144.9	302.8	279.7	28.35	38.03	171.9	166.7	16.96	28.11	146.7	142.3

Table 1 Continued.

	M2 Amp		M2 Pha		S2 Amp		S2 Pha		K1 Amp		K1 Pha		O1 Amp		O1 Pha	
	model	obs														
이시 가키 IC	48.52	44.00	303.1	304.3	24.44	24.47	324.9	331.5	17.25	20.77	97.61	95.75	11.69	17.35	74.33	75.22
흑산 도 HE	101.1	106.6	109.8	130.4	44.14	44.40	132.1	173.0	19.33	23.45	104.2	117.0	11.33	17.40	77.36	98.13
어청 도 OC	176.6	173.3	186.2	185.8	78.69	84.89	222.0	231.0	26.19	32.28	142.4	148.2	16.72	22.21	117.1	125.0
대청 도 DA	89.76	104.3	246.9	268.0	40.51	50.59	281.0	311.5	27.61	34.32	178.4	183.2	16.66	23.31	148.0	158.6

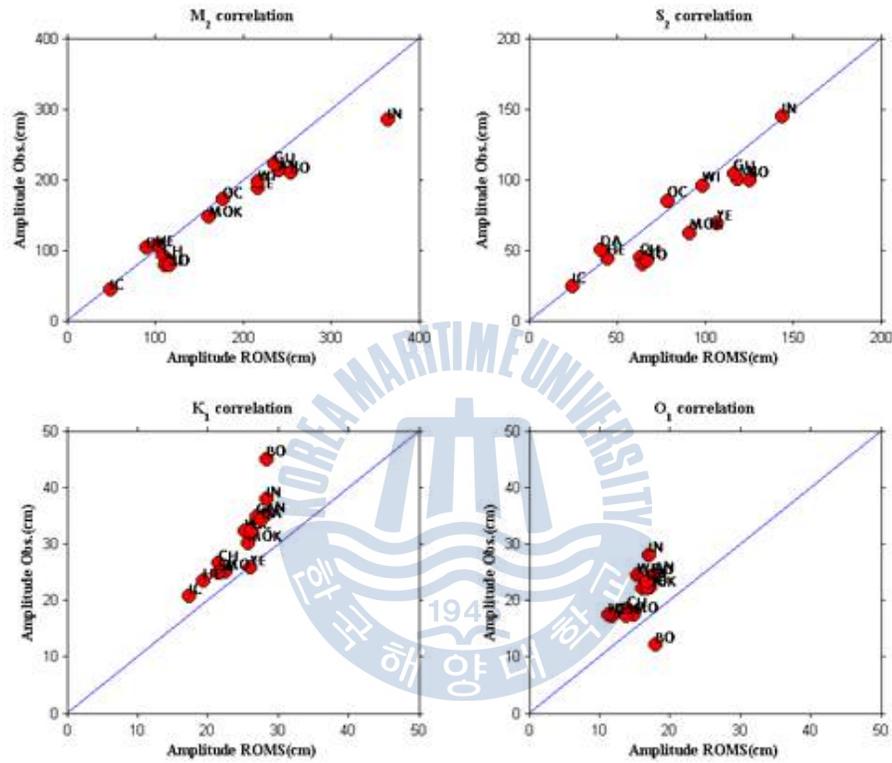


Fig. 13 Comparison between observed data and calculated amplitudes of the M₂, S₂, K₁ and O₁ tides.

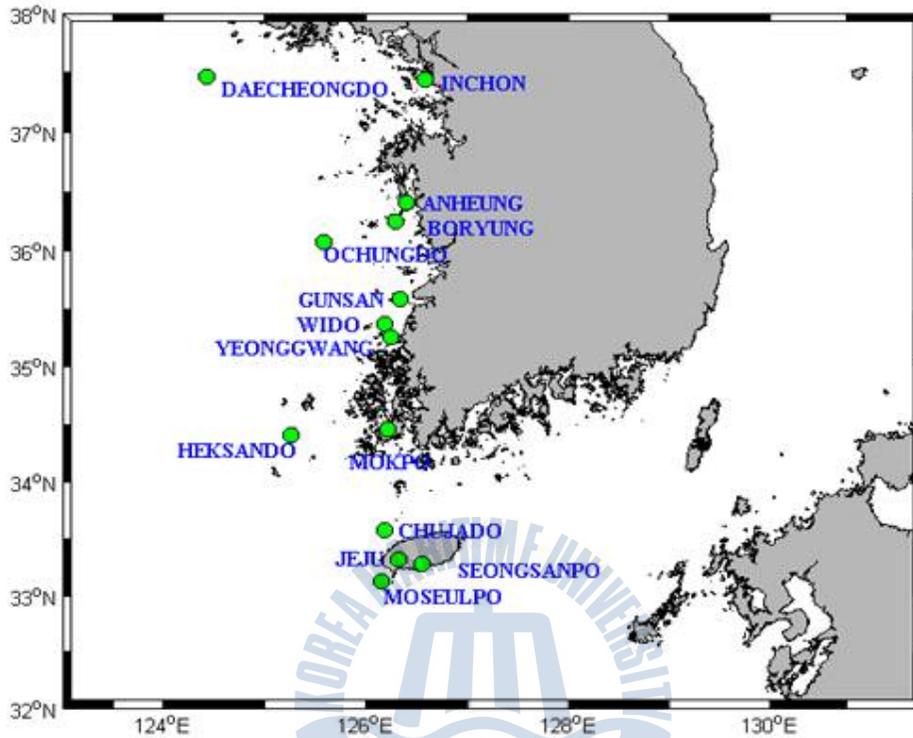


Fig. 15 Location map for tidal elevation stations used for model validation.

3.2 입자 추적 실험

본 실험에서는 추정된 산란장에서 방출된 입자들을 유영능력이 발달하지 않은 난과 유생이라고 가정함에 따라 유생의 유동능력이 발달되기 전까지는 유생의 이동과 분포가 해류에 직접적인 영향을 받는다고 가정하고 입자 추적 실험을 하였다.

입자 추적 방법은 ROMS에서 3차원 유속을 적분함으로써 수행되었다. 유속 적분 방법은 Predictor-corrector method 중의 하나인 Hamming's fourth-order method (Hamming, 1973) scheme을 사용하였다. 이 방법은 ROMS 3.5 version에서 유속 적분 방법으로 사용했던 Runge-Kutta 보다 적분 값을 정확히 유도 할 수 있다. Hamming fourth order method 의 predicted solution은 (3.3)식이고, 이 식에서 유도된 값이 corrected solution (3.4)에 고려됨으로써 이동거리가 계산된다.

$$q'_{i+1}^k = q_{i-3} + \frac{4\Delta t}{3}(2q'_i - q'_{i-1} + 2q'_{i-2}) \quad (3.3)$$

$$q_{i+1}^{k+1} = \frac{1}{8}[9q_i - q_{i-2} + 3\Delta t(q'_{i+1}^k + 2q'_i - q'_{i-1})] \quad (3.4)$$

Robin and Dennis (1999)는 *Loligoforbesi* and *L. vulgaris* 의 겨울 산란군에 수온 환경이 중요하다고 보았다. 따라서 입자 추적 실험 시, 유생과 난괴로 가정된 입자가 적정 수온범위에서 벗어날 경우 즉시 사망하는 것으로 가정 하였고, 초기 유생 단계를 3 단계로 나누어 치사율을 고려하였다. 방출 후 0 ~ 5일 까지의 입자를 난괴로 보았고, 유생을 6 ~ 55일까지의 초기 유생과 56일 이후의 유생 단계를 적용하여 각각의 최소 수온 범위를 15, 14, 13 °C로 설정하였다 (藤井康之, 2004).

결과 분석에 앞서 생존율을 고려한 입자 분포가 관측 패턴과 유사한지를 검증하기 위해 Kim (2012)에서 2008년도 4월과 2009년도 2월달 유생 관측 분포 자료를 모델 결과와 비교 하였다 (Fig. 11). 2008년도 4월의 경우 1월, 2월, 3월에 방출된 입자들이 각각 90일, 60일, 30일 뒤의 분포를 합하여 나타낸 그림이고, 2009년도 2월의 경우 1월에 방출된 입자의 30일 뒤의 분포 패턴을 나타낸 그림이다 (Fig. 17). 제주 남동쪽으로 대부분의 입자가 분포하는 것이 관측 분포 패턴과 잘 일치 하는 것을 확인 할 수 있었다.

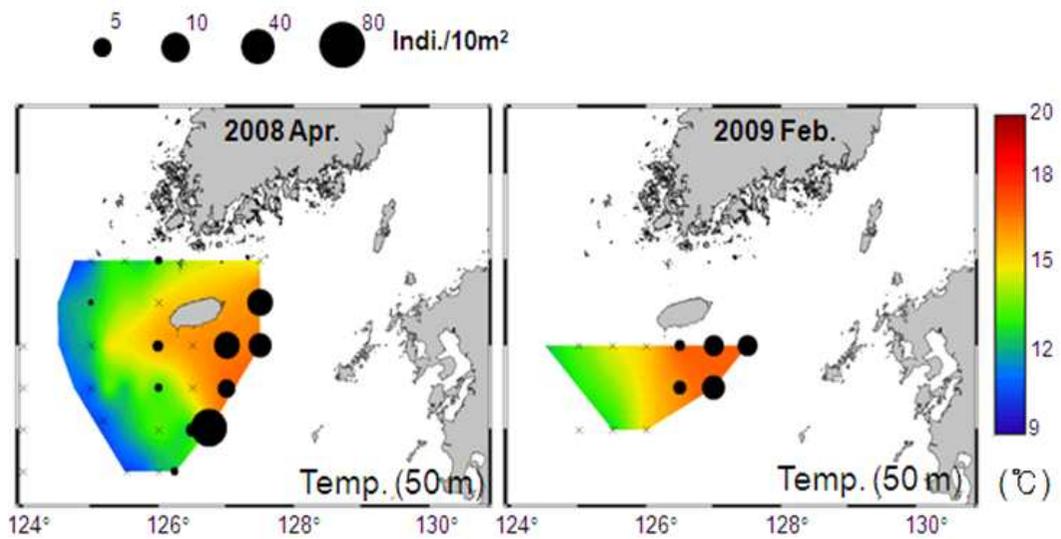


Fig. 16 The horizontal distributions of the *Todarodes pacificus* larvae and temperature (°C) at 50m depth in the northern East China Sea (Kim, 2012).

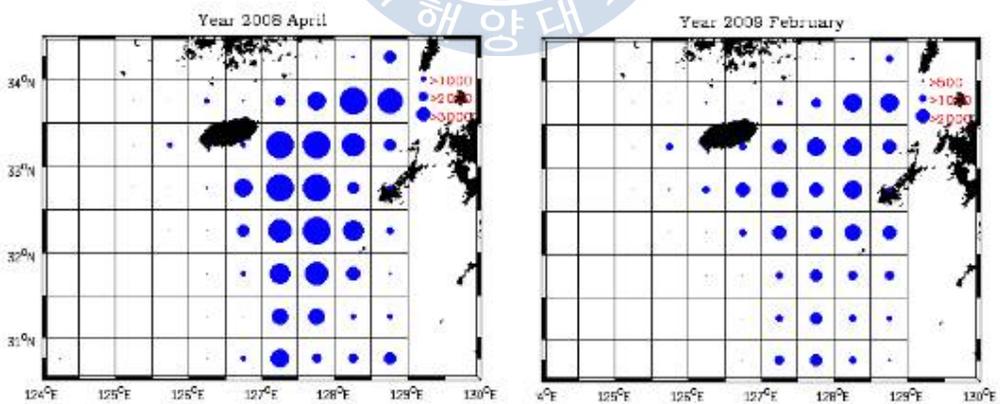


Fig. 17 Model-derived horizontal distributions at 50m depth in the northern East China Sea.

3.2.1 산란장 추정

본 연구에서는 산란장을 추정하기 위해 수온범위를 제외하고, Rosa et al. (2012)의 산란장 추정 범위와 동일하게 적용하였다. Rosa et al. (2012)는 4가지 조건으로 산란장을 추정하였다. 첫 번째 조건은 산란장의 범위가 위도 21°N에서 41°N, 경도 121°E에서 142°E이고, 두 번째는 수심이 100 m에서 500 m 사이이고, 세 번째는 평균 쿠로시오 축 부근이며, 마지막으로 표층 수온 범위가 19.5 ~ 23 °C에서 산란장이 형성 된다고 보았다. Rosa et al. (2012)가 산란장 추정에 사용한 수온 범위는 부화 유생의 생존 비율이 가장 높은 수온 범위로 Sakurai et al. (2006)에 의해 제시되었다. 하지만 본 실험에서는 산란이 가능한 지역에서의 이동패턴을 알아보기 위해 어미가 난괴를 방출하는 수온 범위로 알려진 15 ~ 23 °C로 산란 장을 추정하여 (Sakurai et al. 1996), 추정된 입자들이 rho-point에 등 간격으로 분포하도록 설정하였다. 추정된 산란장 분포는 동중국해에서의 100 m 대륙붕에서 500 m 선을 따라 활모양으로 나타났고, 전체적으로 3월달에 분포 범위가 작았다 (Fig 18).

산란장 추정에 사용한 수온 자료는 국립수산과학원 위성 해양연구실에서 직수신한 NOAA/AVHRR 2005년부터 2010년까지 1월에서 3월까지의 월평균 자료를 이용하였다.

부유 유생단계에서의 수직적인 수심분포는 25 ~ 80 m 로 알려져 있다 (Watanabe, 1965; Yamamoto et al. 2007; Kim et al. 2011). 따라서, 본 실험에서는 1월, 2월, 3월을 각각 30일로 설정하여 Table 2 에서의 입자수가 월별 1일 간격으로 25 m, 50 m, 75 m 에서 방출되도록 설정하였다. 수온에 따른 산란장 형성 환경은 2007년도가 가장 좋은 환경이었던 것으로 보이고, 2009년, 2005년, 2008년, 2006년, 2010년 순으로 환경이 좋지 않았던 것으로 나타났다.

Table 2 The number of particles released in the inferred monthly spawning area from day to day.

	Jun.	Feb.	Mar.	Total
2005	2100	1752	1650	5,502
2006	2041	1836	1605	5,482
2007	2077	1908	1936	5,921
2008	1969	1879	1639	5,487
2009	2006	1855	1752	5,613
2010	2104	1615	1428	5,147

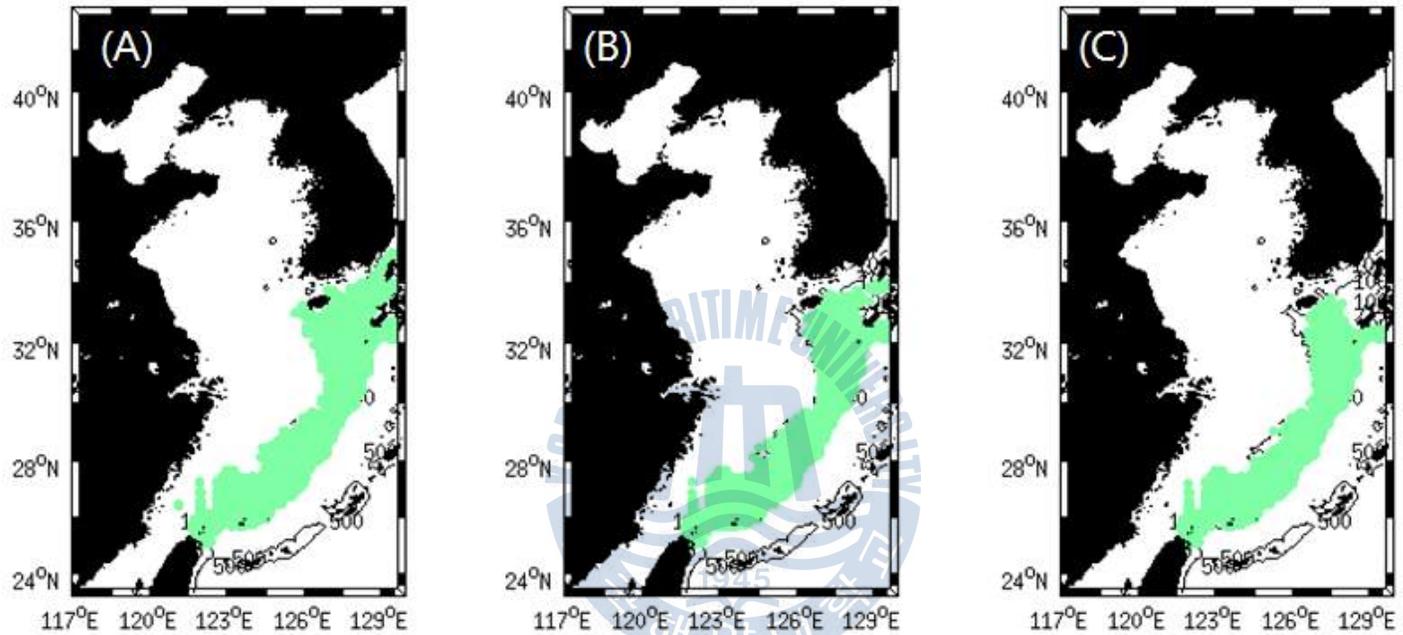


Fig. 18 Inferred Spawning area in 2005, After 2005, the similar pattern appeared. (A) Jan, (B) Feb, (C) Mar.

3.2.2 황해 유입 입자와 황해에서의 어획량과의 상관성

본 실험에서는 해류에 의해 이동된 유생들 중 황해로 유입된 입자수를 계산하기 위해 Fig. 19 영역 (Entrainment Region., 이하 ER)에 유입된 입자들을 황해로 유입할 가능성이 큰 유생으로 가정하여 황해에서의 어획량과의 상관성을 보였다.

Figure 20에서 제시된 황해에서의 어획량을 살펴보면 황해는 어획량의 연변동성이 심한 지역이고, 1970년 이후부터 2000년대까지 장기간을 보면 증가하는 추세이다. 본 연구기간인 2005년도부터 2010년도 사이에는 2006년도에 최고 어획량을 보였고, 이후 어획량이 급격히 떨어지는 패턴을 보였다.

입자들이 ER에 유입되는 기간 범위는 藤井康之 (2004)의 가을 산란군 추적 실험을 고려하여 60일에서 120일까지로 설정 후 ER로의 유입 입자수의 연변동성을 보았다 (Fig. 21). 수온에 의한 생존률을 고려하고, ER에 유입된 입자들중 2월과 3월에 방출된 입자수의 연변동성을 보았을 때, 황해에서의 어획량과 비례 관계를 보였다 (Fig. 21(C)). 생존률을 고려하지 않았을 때에는 기간 차이에 따른 유입패턴 차이가 보이지 않았고 (Fig. 20(A)), 1 ~ 3월에 방출된 입자들의 생존률을 고려했을 때, 기간에 따른 입자수 변동은 나타났지만 황해에서의 어획량과의 연관성은 보이지 않았다 (Fig. 21(B)).

본 실험 결과 수온과 황동중국해에서의 해류의 연변동성에 따른 ER로의 유입 입자수가 황해에서의 어획량을 일부 설명하였고, 유생이 이동능력을 갖는 시기를 80일로 가정하였을 때, Figure 21(B)에서 연 변동 패턴이 크게 벗어나지 않았고, Figure 21(C)에서는 어획량의 패턴을 설명하면서 유입 입자수도 두 번째로 많았다. 따라서 본 실험에서는 80일을 유동 능력을 갖는 시기로 가정 하여 실험 하였다.

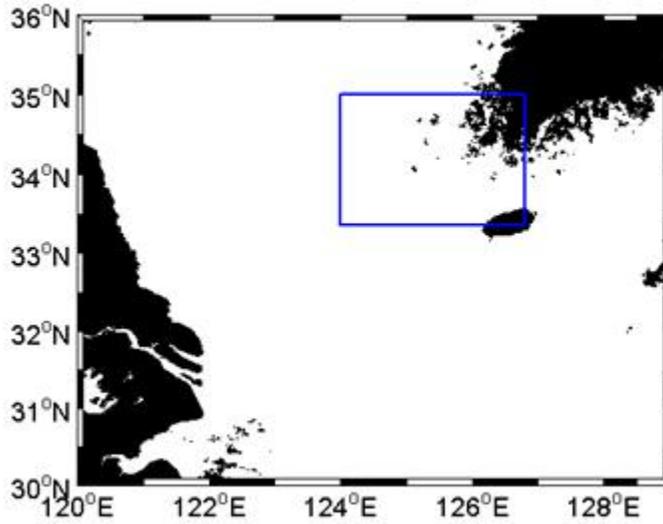


Fig. 19 The hypothesized space for *Todarodes pacificus* larvae to the moving into the Yellow Sea.

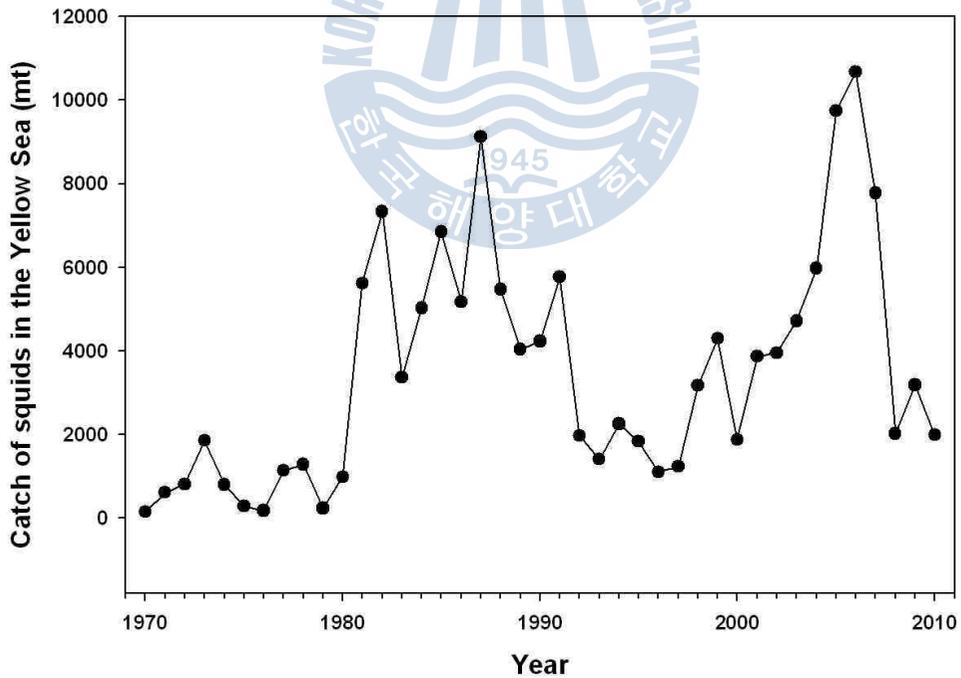


Fig. 20 Yearly catch of squids in the Yellow Sea in 1970 ~ 2010 (Choi et al. 2010).

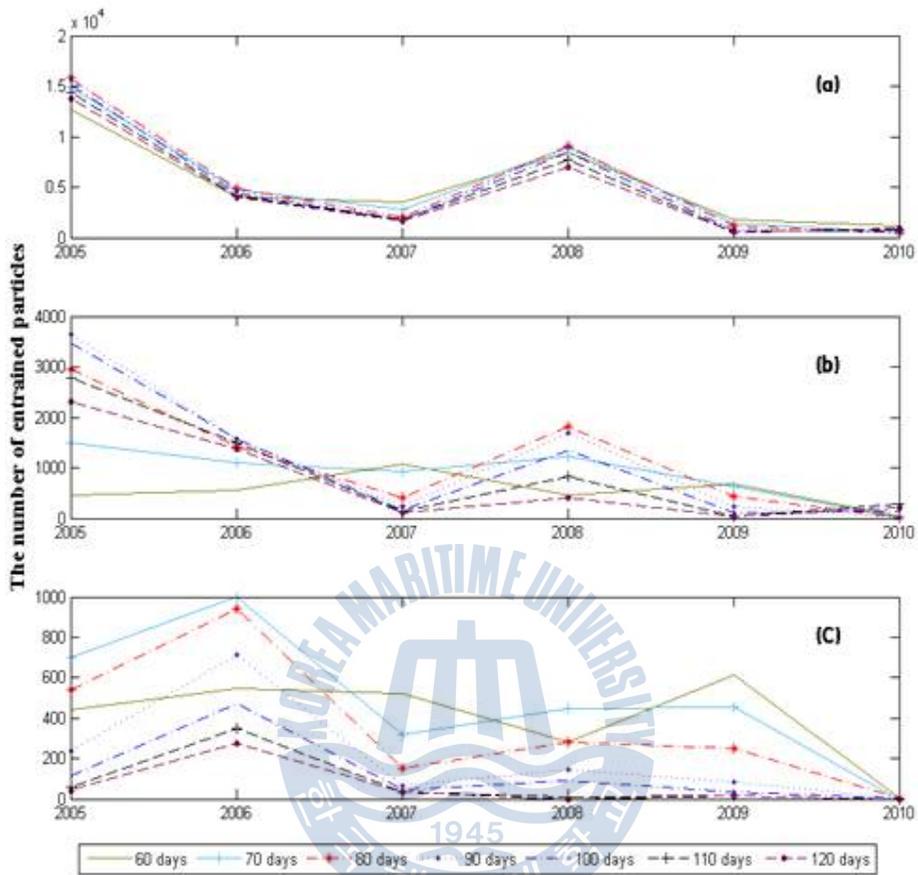


Fig. 21 Time series of fluctuations of the number of entrained particles from 60 days to 120 days after release. (a) The number of total entrained particles , (b) The number of entrained survived particles from January to march, (c) The number of entrained survives particles for January to February.

3.2.3 유생의 이동 경로

본 실험에서는 흐름에 의한 입자 이동을 알아보기 위해 겨울 산란장을 하부(A), 중부(B), 상부(C) 로 나누어 확인 하였다 (Fig. 22). 3 지역에서의 입자들은 대부분 Isobe et al. (2008)에 의해 언급된 쿠로시오 (Kuroshio), 대만난류 (Taiwan Warm Current, 이하 TWC), 북동방향의 쿠로시오 지류 (Northeastward Kuroshio Branch, 이하 NKB), 북해류 (Northward current, 이하 NK)를 따라 북동방향으로 이동 후 대한해협과 도카라 해협을 통해 나갔다 (Fig 1). Figure 23를 보면 A 지역에서 방출된 입자들은 유동능력을 갖는 시기로 추정된 80일 동안 크게 다른 두 패턴을 보였다. 쿠로시오 흐름을 따라 20일 이내에 도카라 해협으로 방출되는 입자들과 NKB를 따라 80일 이내에 해협을 통해 나가지 못하고 동중국해 중부지역에 유입되는 입자들이 있었다. 따라서 본 실험에서는 A지역에서 방출되어 80일 이내에 해협을 통해 방출되지 못한 일부 입자들의 이동 경로를 파악하기 위해 이동기간을 60일, 90일, 120일로 나누어 살펴 보았다 (Fig. 24). 60일째 동중국해 중부에 유입된 입자들은 8개의 입자들을 제외하고는 NC를 따라 120일째 대한 해협에 유입되어 동해로 방출되는 것이 보였다. 본 실험결과에서는 Rosa et al. (2011)에 의해 제시된 A지역부근에서의 유생들이 TWC를 따라 황해로 유입된다는 가정을 설명할수 없었다 (Fig. 25).

B지역과 C 지역에서 방출된 입자들도 NKB와 NK를 따라 대한해협에 유입되는 것과 쿠로시오를 따라 도카라 해협으로 나가는 패턴이 보였다. B지역에서 방출된 입자들이 대한해협에 유입되는데 걸리는 기간은 대략 70일에서 80일 정도였고, C지역에서 방출된 입자들이 대한해협에 도달하는데 걸리는 시간은 40일에서 50일 정도였다. 쿠로시오에 따라 이동되는 입자들은 A지역에서의 패턴과 유사했다. B지역과 C지역에서 방출된 입자들의 일부가 제주난류에 의해 일부 ER로 유입되었고 B지역보다 C지역에서 방출된 입자들이 제주 부근을 많이 거쳐 방출되는 패턴을 보였다.

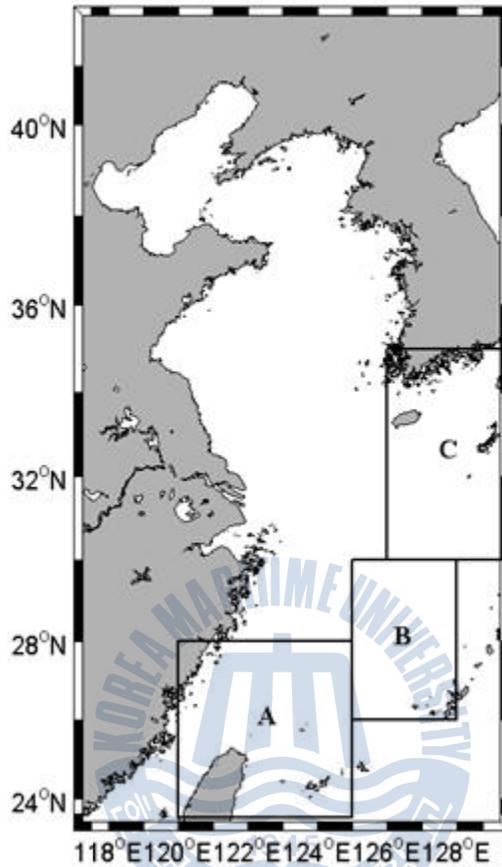


Fig. 22 Three subareas used in the study. (A) the southernmost part of our study area, (B) the central part of the East China Sea, (C) the area surrounding Kyushu Island, potential spawning area for both the autumn and the winter cohorts (Sakurai et al. 2000).

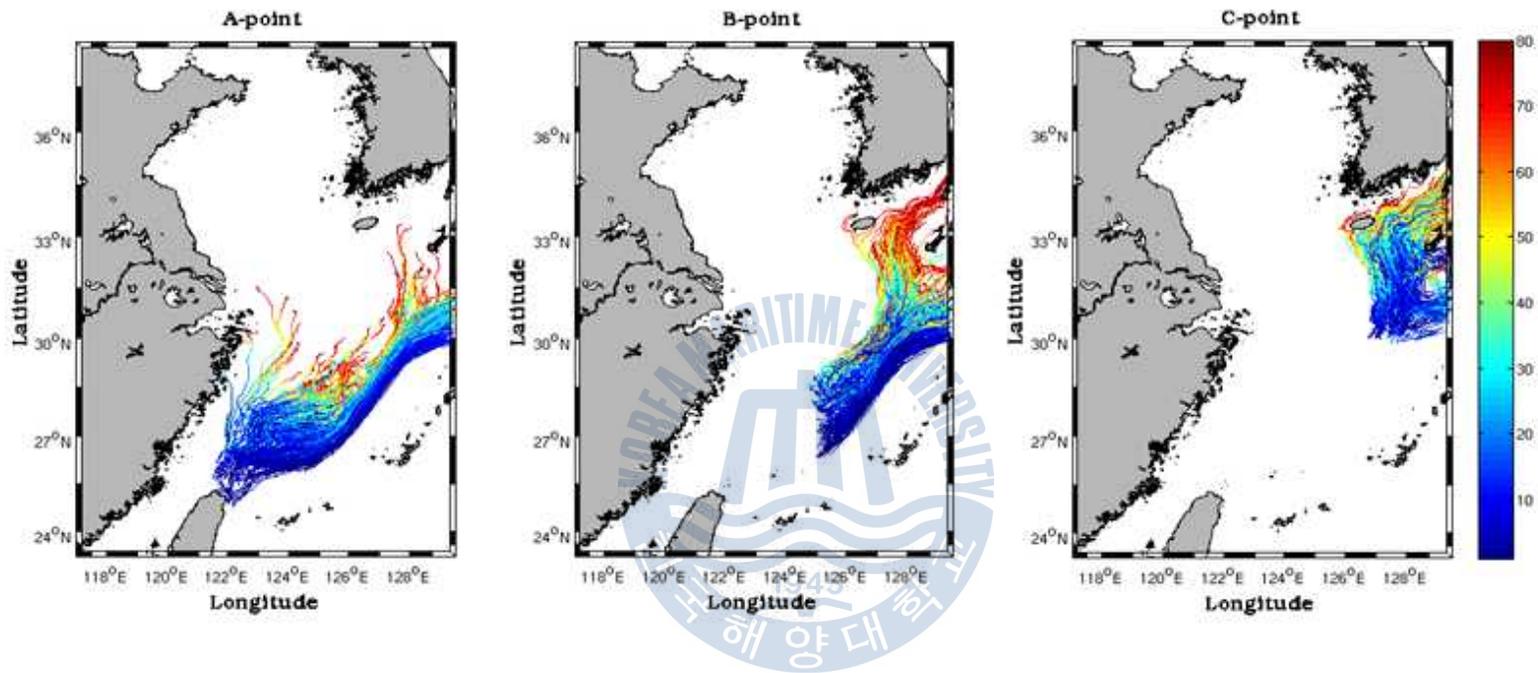


Fig. 23 Temporal changes of particle trajectories at each release site calculated by model in 2005. After 2005, the similar pattern was simulated. Different colors indicate the released term (days).

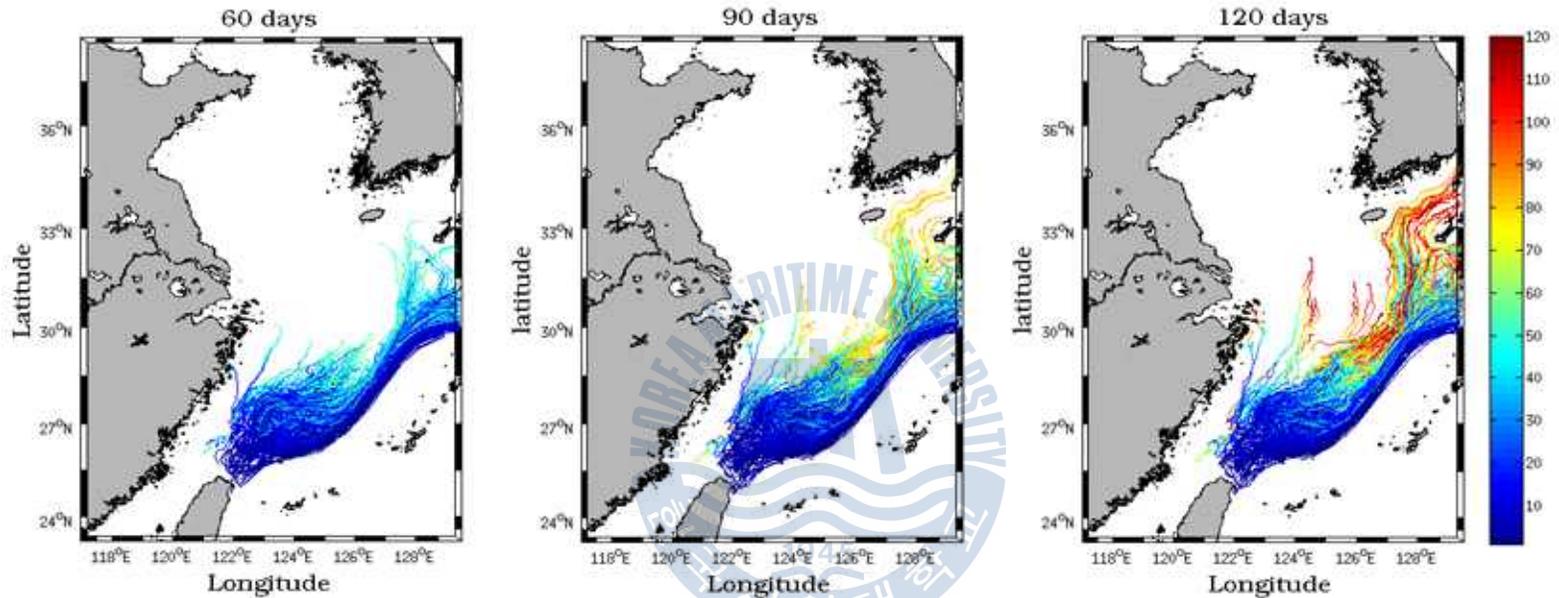


Fig. 24 Temporal changes of particles trajectories simulated by model for 60, 90 and 120 days in 2005. After 2005, the similar pattern was simulated. Different colors indicate the released term (days) in the subarea A (Fig. 20).

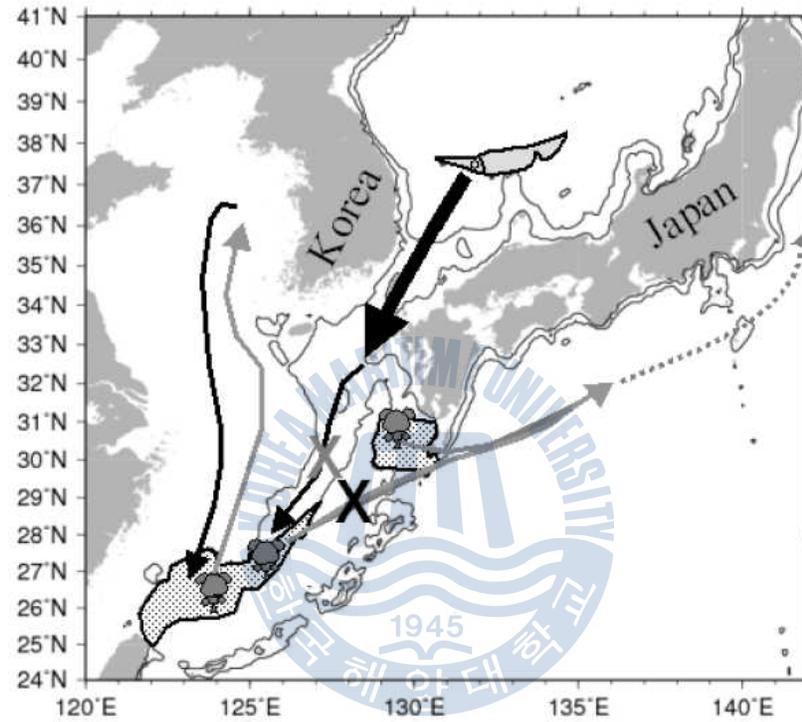


Fig. 25 Hypothesized mechanism occurring in years with unfavourable spawning area distribution pattern as suggested by Rosa et al. (2011).

3.3 황해로의 유입패턴 분석

3.3.1 ER 유입 분석

산란장에서 방출된 입자들이 방출 후 80일 동안 해수유동에 의해 이동된다고 가정할 때, 이 입자들이 도카라 해협과 대한해협을 통해 연구영역에서 나가는 기간과 이 해협들을 통과할 때의 치사율을 계산하였다. 각 산란장에서 대한해협을 통과한 기간이 가장 짧은 해는 2007년이었고, 다음으로 2010년, 2009년이 짧았다. 입자들의 통과기간이 짧았던 해는 대한해협을 통해 나간입자의 비율이 50% 이상으로 높았고, 치사율 비율도 2005년, 2006년, 2008년도에 비해 높았다 (Table 3(a)). 도카라 해협에서의 입자 통과 기간은 전체적으로 대한해협보다 짧았고, 2005년, 2006년, 2008년은 통과 입자 비율이 대한해협과 비슷하게 나왔지만, 2007년, 2009년, 2010년 에는 대한해협에 비해 적은 입자 통과 비율을 보였다 (Table 3(b)). 본 실험 결과 ER로의 유입 입자수가 적었던 2007년, 2009년, 2010년도는 대한해협으로의 통과 유생이 많고, 유생의 치사율도 높았던 것으로 보인다.

입자가 방출 후 80일이 되었을 때, 60~70% 이상은 두 해협을 통해 연구해역에서 나가고, 30~40%의 입자들이 동중국해 지역에 남아있는 것으로 나타났다 . 이 남아있는 입자들의 대부분은 동중국해에 분포하고 연구기간동안 평균 3.38% 정도가 ER에 유입이 되었는데, 1월에서 3월로 갈수록 적게 유입되는 것으로 나왔다 (Table 4). 이 결과는 대한해협에서의 유량이 1월에서 3월로 갈수록 커지는 것과 연관이 있는 것으로 보인다 (Fukudome et al. 2010).

Table 3 The periods of the pass in (a) Korea Strait and (b) Tokara Strait, the particle mean periods, particle left rate, and survival rate by temperature for 80 days after monthly released during Jan - Mar. from 2005 to 2010.

(a) Korea Strait

Year	Jan.	Feb.	Mar.	mean periods	left rate (%)	survival rate(%)
2005	41.28	46.18	47.56	45.01	34.19	67.09
2006	41.51	47.69	60.01	49.74	35.77	67.20
2007	40.95	39.46	38.23	39.55	52.94	92.88
2008	36.26	43.56	52.22	44.01	37.33	78.65
2009	39.2	42.56	44.86	42.21	55.35	95.70
2010	35.67	44.81	42.28	40.92	54.75	88.82

(b) Tokara Strait

Year	Jan.	Feb.	Mar.	mean periods	left rate (%)	survival rate(%)
2005	27.2	29.2	19.3	25.23	34.26	95.48
2006	22.3	28.54	33.24	28.03	31.32	90.81
2007	23.4	19.17	19.49	20.69	21.20	93.87
2008	33.9	28.9	29.75	30.85	28.33	93.01
2009	25.47	28.46	35.04	29.66	16.25	98.06
2010	20.61	18.33	18.51	19.15	22.52	92.95

Table 4 Monthly Entrained-particle rates in the ER of the left particles in the study area for 80 days after monthly released during Jan - Mar. from 2005 to 2010.

Year	Jan.	Feb.	Mar.	mean entrained-particle rate (%)
2005	19.33	5.24	0.12	8.23
2006	4.17	3.55	0.33	2.68
2007	4.24	1.15	0.07	1.82
2008	10.94	2.46	0.26	4.55
2009	1.45	0.43	0.02	0.63
2010	1.08	0.02	0.02	2.34

3.3.2 산란장 역추정

연구기간동안 어획량과의 패턴이 유사했던 2월, 3월의 방출 후 80일째의 ER에 유입된 입자들의 초기 방출 지역을 역추정 하였다 (Fig. 26). 초기 방출 지역을 Fig. 3.18와 같이 나누어 살펴 보았을 때, C 지역의 입자들이 ER에 가장 많이 유입되었고, B지역의 고위도 지역에서 일부 유입이 되었다. Rosa et al. (2011)가 가정했던 A지역에서의 입자들은 ER로의 유입이 보이지 않았다. 따라서 황해로 유입될 가능성이 큰 유생의 초기 산란장은 C 지역으로 추정되고, 이 지역에서의 산란장 환경이 황해에서의 어획량에 직접적인 영향을 미칠 것으로 보인다.



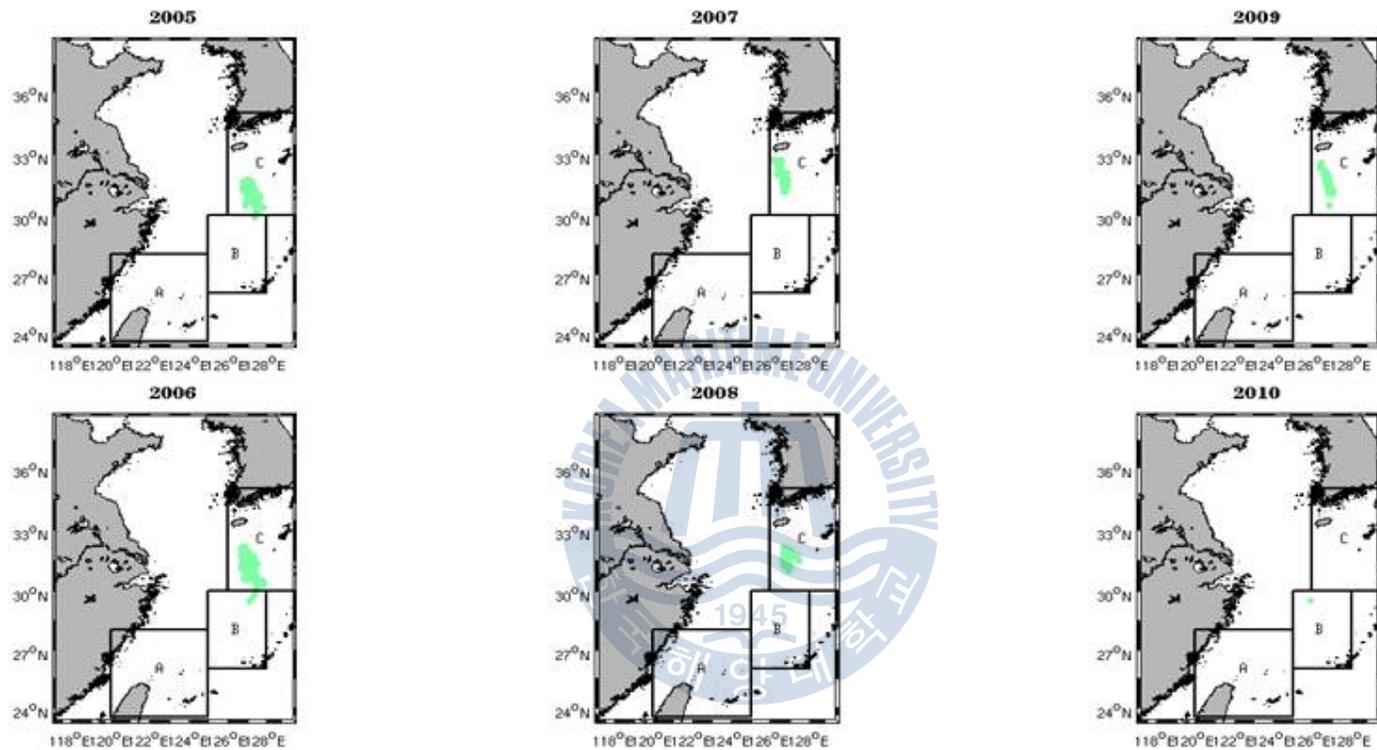


Fig. 26 Initial spawning area of entrained-particles in the ER from Feb. to Mar. during the study periods.

제 4 장 토의

동중국해에서의 살오징어 유생의 이동패턴을 알아보기 위해 우선적으로 관측자료가 필요하지만, 살오징어 유생의 움직임을 시·공간적으로 보여주지는 못한다. 따라서 본 연구에서는 살오징어 유생의 황해유입에 관한 매커니즘을 알아보기위해 Rosa et al. (2011)의 방법과 유사하게 산란장을 추정하여 2005년부터 2010년까지 해수유동 모델 결과로 나오는 흐름에 의한 유생의 이동을 알아보고 ER로 유입되는 입자의 산란장을 역추정하였다. Rosa et al. (2011)의 산란장 추정 방법에서 수온범위를 넓혔을 때 산란장 범위가 Figure 22에서 C 지역인 제주북서부와 대한해협까지 넓어졌다. 이런 분포는 Sakurai, (2000)에서 수온이 올라감에 따라 대한해협과 고토 섬 (Goto Islands)에서 겨울발생군과 가을발생군이 같이 나타난다고 제시된 것에 근거한다.

추정된 산란장에서 방출된 입자들은 쿠로시오와 쿠로시오 지류에 의해 북동쪽으로 흐른 후 도카라 해협과 대한 해협을 통해 각각 북서태평양과 동해로 나간다 (Fig. 23). 입자들은 80일 정도가 지나면 60 ~ 70%가 연구해역에서 벗어났고, 30 ~ 40% 가 남아 있게 되었는데, 이중 3.38%가 황해로 유입될 가능성이 있는 것으로 나왔다. 그리고 황해로 유입될 가능성이 있는 입자들의 초기위치는 C지역인 큐슈북서쪽으로 Rosa et al. (2011)가 제시한 A지역이라고 가정한 것과 다르게 나왔다 (Fig. 22). Rosa et al. (2011)는 표층수온에 따른 B지역에서의 산란장 형성 유무가 유생의 이동경로에 변화를 줄 것이라고 보았고, B지역에서 산란장이 형성되지 않았을 때, A지역의 유생들이 대만난류에 의해 황해로 유입된다고 보았다 (Fig. 25). 하지만 A 지역에서 방출된 입자들이 유영능력이 발달되는 시기로 추정한 80일이 되었을 때 일부가 B지역으로 천천히 유입하는 패턴을 보였다. Takahash et al. (2013)에 따르면 TWC는 NKB와 합쳐져 대한 해협을 통해 나가고 NKB의 평균 유속은 20 cm/s 이다. 따라서 A 지역에서 NKB를 따라 쿠로시오에 비해 천천히 이동한 유생들이 80일 이후 유동능력이 생겼다고 해도 20 cm/s 의 유속을 거르를 수는 없을 것으로 보임에 따라 Rosa et al. (2011)의 가정을 뒷받침 하지는 못한다. 또한 연구기간에 Rosa et al. (2011)의 산란장 추정 방법을 동일하게 적용하였을 때, 모든 B지역에서 산란장이 형성되었다. 따라서 어획량이 좋았던 2005년, 2006년, 2007년도와 어획량이 적었던 2008년, 2009년, 2010년도의 차이를 뒷받침해

주지 못함에 따라 수온에 의한 B에서의 산란장 형성 유무보다 해류 패턴과 수온의 연변동성에 따른 생존률이 황해에서의 어획량에 더 큰 영향을 미치는 것으로 보인다.

방출 후 80일 동안 이류에 의해 ER에 유입된 입자들과 황해에서의 어획량을 비교했을 때, 설명되지 못하는 부분이 있었다. 첫 번째는 1월에 방출되어 3월 중순 ~ 4월 초에 ER에 유입된 입자들은 어획량을 설명하지 못했다 (Fig. 21). 3월은 황해에서의 수온이 연중 가장 낮은 달이기 때문에 유입된 유생의 치사율이 높아 1월에 유입된 입자량이 어획량을 설명하지 못하는 것으로 판단된다.

두 번째는 ER에서의 유입량과 어획량과의 패턴이 2007년도에 설명되지 못했다. Figure 21의 c는 2007년도에 유입량이 적은 편이었지만, Figure 20에서의 2007년 황해에서의 어획량은 높은 편이었다. 겨울 산란군의 80일 뒤의 ER에서의 환경을 알아보기 위해 국립수산과학원 위성해양연구실에서 직수신한 표층수온 (Fig. 27)와 클로로필 (Fig. 28)의 3 ~ 5월 분포를 보면, 2007년도 제주 북동쪽 환경은 2008년과 2009년도에 비해 수온이 높아 치사율이 적고, 클로로필 양도 많아 먹이 환경이 좋았던 것으로 판단된다. 따라서 어획량이 많은 편이었던 2007년도에는 유생의 유입률은 적었지만 황해에서의 환경이 좋아 생존률이 높았던 것으로 보인다.

본 연구에서 가정된 산란장과 수온에 따른 치사율 계산법은 실제 자연현상을 충족시키지는 못한다. 실제 산란장은 일정 간격으로 분포하고 있지 않고, patch 형태이며, 산란장에서의 대기환경에 따른 수괴의 안정성 여부는 산란장이 형성되는데 큰 영향을 미친다. 또한 어획량에 대한 신뢰성 문제와 초기 유생단계에서 치사율에 영향을 미치는 다른 요인들을 반영하지 못함에 따라 산란장에서 황해로 유입된 입자와 어획량을 직접적으로 연관시켜 보는 것은 한계가 있다. 추후 연구에서 살오징어 유생의 생활사 단계에 따른 특성과 관측에 근거한 실질적인 산란장 연변동성을 고려한다면 보다 실제에 가까운 살오징어 유생의 자원으로써의 가입을 이해할 수 있을 것으로 생각된다.

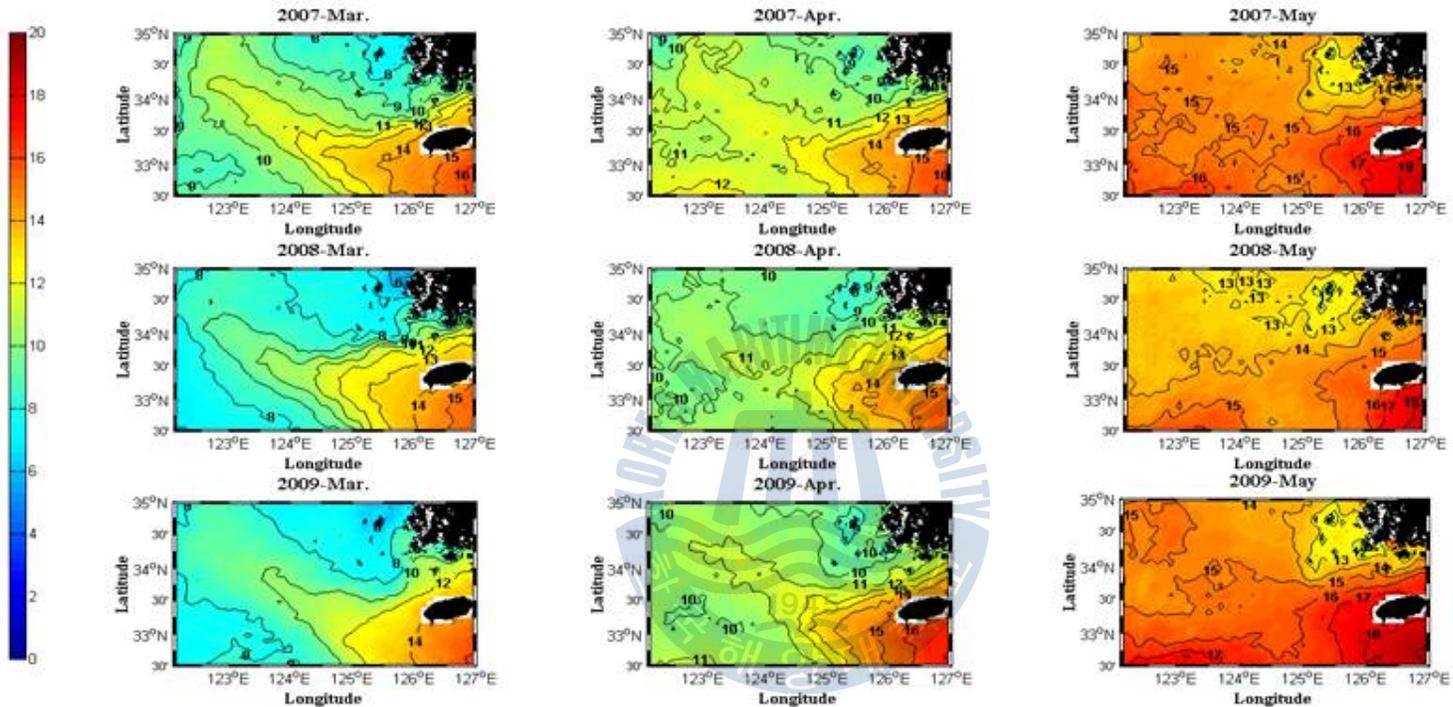


Fig. 27 Spatial distribution of surface Temperature ($^{\circ}\text{C}$) produced satellite ocean lab., NFRDI KOR in the months Mar. - May from the 2007 to the 2009 . Different colors indicate the sea surface temperature.

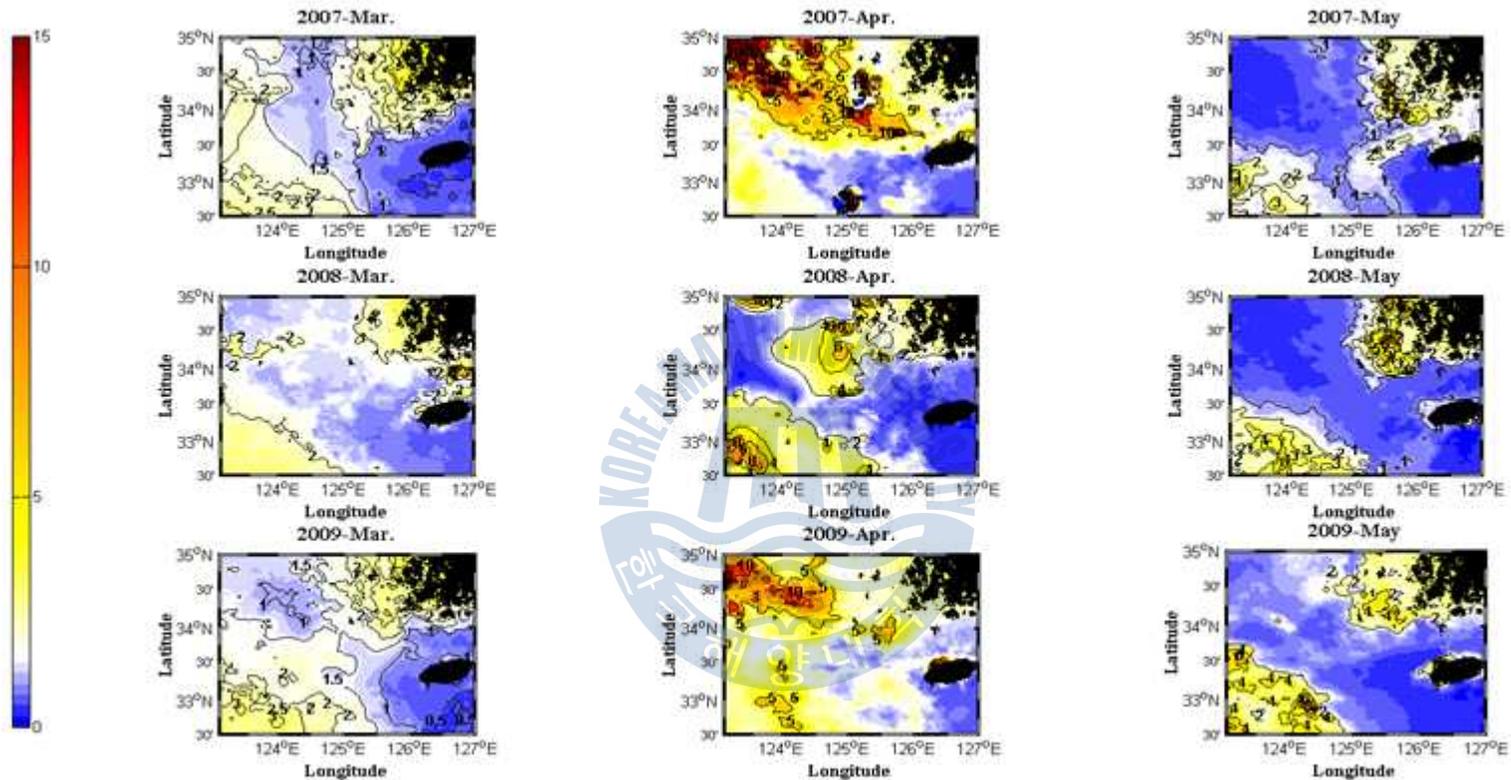


Fig. 28 Same as Fig. 27, except for surface Chl-a concentration (mg/m^3).

참고문헌

- 김중진, 이화현, 김수암, 박철. 2011. 동중국해 북부해역에서의 살오징어 (*Todarodes pacificus*) 유생의 분포. 한국수산학회지, 44(3), pp.267-275.
- 柳哲雄, 1994. Material Transport in the Yellow/East China Seas. 沿岸海洋研究ノート, 第31卷,第2号, pp.239-256.
- 藤井康之., 直毅渡邊達, & 木所英昭., 2004, 日本海におけるスルメイカ卵稚仔の輸送シミュレーション. 海と空, 80(1), pp.9-17.
- Araya, H.,1967. Resources of common squid, *Todarodes pacificus*, Steenstrup in the Japanese waters. J. Jan.Fisheries Research. 16(60).
- Bao, X. Gao, G. & Yan, J., 2001. Three dimensional simulation of tide and tidal current characteristics in the East China Sea. *Oceanological Acta*, 24, pp.135-149.
- Choi, B.H., 1980. A tidal model of the Yellow Sea and the Eastern China Sea. *Korea Ocean Research and Development Institute(KORDI) Report* 80-02, pp.1-72.
- Chapman, D.C., 1985. Numerical treatment of cross-shelf boundaries in a barotropic coastal ocean model. *Journal of Physical Oceanography*, 15, pp. 1060-1075.
- Flather, R.A., 1976. A tidal model of the northwest European continental shelf. *Memoires de la Society Royal des Sciences de Liege*, 6(10), pp.141-164.
- Fang,G., 1986. Tide and Tidal current charts for the marginal seas adjacent to China. *C. J. of Oceanology and Linnology*, 4, pp.1-16.
- Fairal, C.W et al., 1996. Bulk parameterization of air-sea fluxes in TOGA COARE. *Journal of Geophysical Research*, 101, pp.3747-3767.
- Frank, K. T., Carscadden J. E., & Legget, W.C., 1993. Causes of spatio-temporal variation in the patchiness of larval fish distributions: differential mortality of behaviour?. *Fisheries Oceanography*, 2, pp.114-123.
- Hamabe, M., & T. Shimizu., 1966. Ecological studies on the common squid,

- Todarodes pacificus* Steenstrup, mainly in the southwestern waters of Japan Sea. Bulletin of the Fisheries Research Laboratory, 16, pp.13-55.
- Isobe, A., 2008. Recent advance in ocean-circulation research on the Yellow Sea and East China Sea shelves. *Journal of Oceanography*, 64, pp.569 - .584.
- Kim, B.A., 1984, Oceanographic conditions and fishing grounds of Common squid, *Todarodes Pacificus*(Steenstrup), in the Yellow Sea off Korea. Bulletin of the Fisheries Research Laboratory, 33 pp.21-33.
- Kim, J.J., 2012. A study of early life stage for Japanese common squid (*Todarodes pacificus*) based on observations and modelling approaches. 부경대학교 박사 학위 논문, pp.1-99.
- Kasahara, S., 1978. Descriptions of offshore Squid Angling in the Sea of Japan, with Special Reference to the Distribution of Common Squid and on the Techniques or Forecasting Fishing Conditions. Bulletin of the Fisheries Research Laboratory, 29 pp.179-199.
- Kim, Y.H. & Kang, Y.J, 1995. Population analysis of the common squid, *Todarodes pacificus* Steenstrup in Korean waters 1. Separation of population journal of the Korean Fisheries Society, 28(2), pp.163-173.
- Kang, S.K., Lee, S.R., Lie & H.J., 1998. Fine Grid Tidal Modeling of the Yellow and East China Seas. *Continental Shelf Research*, 18, pp.739-772.
- Ken-Ichi Fukudome et al., 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
- Larsen et al., 1985. East China Sea tide currents. *Continental Shelf Research*, 4, pp.77-103.
- Lee, H.J et al., 2002. A three dimensional mixed finite-difference Galerkin function model for the oceanic circulation in the Yellow Sea and the East China Sea in the presence of M_2 tide. *Continental Shelf Research*, 22, pp.67-91.
- McGurk, M. D., 1987. The spatial patchiness of Pacific herring larvae. *Environmental Biology of Fishes*, 20, pp.81-89.

- Murata M., 1989. Population assessment, management and fishery forecasting for the Japanese common squid, *Todarodes pacificus*. *invertebrate fisherie* pp.613-636
- Nakata, H., 1996. Coastal fronts and eddies: their implications for egg and larval transport and survival process. pp.227-244.
- Nishida, H., 1980. Improved tidal charts for the western part of the North Pacific Ocean. Report of Hydrography and Ocean Sciences, 15, pp.55-70.
- Ogura, S., 1933. The tides in the sea adjacent to Japan. Bulletin of the Hydrographic Department, *Imperial Japanese Navy*, 7, pp.1-189.
- Okutani, T., 1983. *Todarodes pacificus*. In: Cephalopod life cycles. edited by Boyle, P.R., Vol 1. *Academic Press, London*, pp.201-216.
- Rosa AL, Yamamoto J., & Sakurai Y., 2011. Effects of environmental variability on the spawning areas, catch, and recruitment of the Japanese common squid, *Todarodes pacificus* (Cephalopoda: Ommastrephidae). *ICES Journal of Marine Science*, 68(6), pp.1114-1121
- Roper, C.F.E., R.E. Young & G.L. Voss, 1969. An illustrated key to the families of the order *Teuthoidea* (Cephalopoda). *Smithsonian Contributions to zoology*, 13, pp.1-32.
- Smith, P.W., 1990. On knots and nodes for spline interpolation, Algorithms for Approximation II, *J.C. Mason and M.G. Cox, Eds., Chapman and Hall, New York*
- Stabeno, P. J. et al., 1996. Observed patches of walleye Pollock eggs and larvae in Shelikof Strait, Alaska: their characteristics, formation and persistence. *Fisheries Oceanography*, 5, pp.81-91.
- Robin, J-P. & Dennis, V., 1999. Squid stock fluctuations and water temperature: Temporal analysis of the English Channel Loliginidae. *Journal of Applied Ecology*, 36, pp. 101-110.
- Sakurai, Y et al., 1996. Effect of temperature on development and survival of *Todarodes pacificus* empyos and paralarvae. *Bull American Journal*, 13, pp.89-95.
- Sakurai Y et al., 2000. Changes in inferred spawning areas of *Todarodes pacificus* (Cephalopoda: Ommastrephidae) due to changing environmental conditions. *ICES*

Journal of Marine Science, 57, pp.24-30

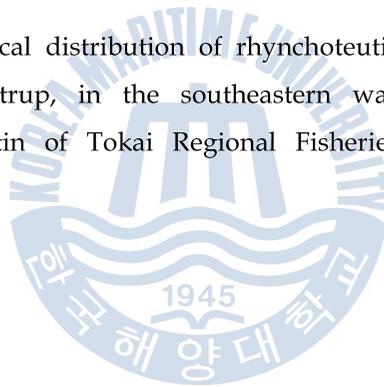
Sakurai, Y., 2006. How climate change might impact squid populations and ecosystems: a case study of the Japanese common squid, *Todarodes pacificus*. *Globec Report*, 24, pp.33-34.

Takahashi, Daisuke., Morimoto., & Akihiko., 2013. Mean field and annual variation of surface flow in the East China Sea as revealed by combining satellite altimeter and drifter data. *Progress in Oceanography*, 111, pp.125-139

Townsend, D. W., & Pettigrew, N. R., 1996. The role of frontal currents in larval fish transport on Georges Bank. *Deep-Sea research. part II, Topical Studies in Oceanography*, 43, pp.1773-1792.

Voss, G.L., 1977. Present status and new trends in cephalopod systematics. *Symposium of the zoological Society of London*, 38, pp.49-60.

Watanabe T., 1965. Ecological distribution of rhynchoteution larva of common squid, *Todarodes pacificus* Steenstrup, in the southeastern waters off Japan during the winters, 1959-1962. *Bulletin of Tokai Regional Fisheries Research Laboratory*, 43, pp.1-12.



감사의 글

어느덧 2년 반 동안의 석사 학위 과정을 마무리 하게 되었습니다. 학부때 실험실 생활을 통해 좋은 선배님과 동기를 만났고, 학위 과정동안 과학원 생활을 통해 많은 가르침을 받아 지금의 제가 있을 수 있는 것 같습니다.

먼저 제가 연구를 할수 있도록 이끌어 주신 지도 교수님께 감사드립니다. 해양 물리에 대한 낯섦과 어려움이 있었지만 부족한 부분을 차분히 이해 할 수 있도록 지도해 주셔서 여기까지 올수 있었습니다. 앞으로도 부족한 부분을 배우면서 발전하는 제자가 되도록 하겠습니다. 그리고 처음 사회 생활을 시작으로 부족하고 실수 투성이었던 저를 믿어 주시고, 지도 해주신 이준수 박사님께 감사드립니다. 그리고 곧 태어날 똑똑이 축하드려요 또한, 본 논문을 심사해 주신 한박사님께도 감사드립니다.

학부때 이후로 학교에 자주 가지도 못하고, 옆에 있지는 못해도 항상 큰 의지가 되고 챙겨 주었던 희진언니, 현정언니, 미옥언니, 보경언니 죄송하면서도 감사합니다. 그리고 예술이, 상업이, 현경이에서 항상 챙겨줘서 고맙다는 말 전하고 싶습니다. 새로 들어온 기욱이랑 은선이, 옆에서 챙겨주지 못해 미안하고 앞으로 하는 일 모두 잘 되었으면 좋겠습니다.

항상 같이 생활하는 박명희 박사님, 김중진 박사님께 학위 과정동안 항상 옆에서 챙겨 주시고, 많은 조언 해주셔서 감사하다는 말씀 전하고 싶습니다. 아무것도 모르고 과학원 와서 어색하고 낯설었는데 친근하게 다가와 주시고, 편하게 해주셔서 즐겁게 생활 할수 있었습니다. 그리고 준하언니, 언니랑 같이 살아서 즐겁고, 앞으로 언니가 하고자 하는 일 잘 되었으면 좋겠습니다 .

마지막으로 항상 잘 믿어주고 사랑해 주시는 부모님과 기정이, 기인이에게 진심으로 감사드리고 앞으로도 더욱 열심히 하는 딸, 누나 되겠습니다. 진심으로 사랑합니다.