



## 수치실험에 의한 한국 동해 연안용승해역의 영양염 분포 특성

김동선 · 서호산 · 정용현\*  
(부경대학교)

### Nutrient Distribution Characteristics by Numerical Experiment around Coastal Upwelling Area in the East Sea of Korea

Dong-Sun KIM · Ho-San SEO · Yong-Hyun CHUNG\*  
(Pukyong National University)

#### Abstract

Numerical modeling was conducted to understand characteristics of nutrient distributions caused by wind currents which occur upwelling in the East sea of Korea. Averaged northeastward wind speed of 9.1m per second which occurred upwelling strongly in 2013 was applied in numerical modeling and wind-driven currents was calculated. Water moved northeastward from coastal area to open sea in surface layer, which develop clockwise or counterclockwise eddies. In bottom layer, However, water moved westward to compensate the surface water. Spatio-temporal distributions of nutrient affected by wind-dirven currents were investigated using the numerical model. As time passes, nutrient concentrations increased gradually, spreading to open sea in coastal area from Pohang to Yeongdeok. Highly accumulated nutrients in bottom layer was risen to the surface by upwelling currents. Risen nutrients spread open sea gradually.

**Key words** : Numerical modeling, Upwelling, Nutrient, Wind-driven currents, Eddy

#### I. 서론

대상해역인 용승해역은 한국 동해 연안역에 위치한다. 연구해역 서쪽에 연안을, 동쪽으로 외해를 두고 있다. 동해는 200 m 수심 이후 수심이 급격히 깊어지며, 경북 울진군 후포 앞바다에는 해저용기부인 후포퇴(길이 : 80 km, 폭 3~16 km)가 존재한다. 연안용승은 연안역에서 저층으로부터 찬 해수가 상승하는 것을 말한다. 북반구에

위치한 한국 동해안에서는 좌측(서쪽)에 육지를 두고 해안선과 평행한 방향으로 수 일간 바람이 지속적으로 불 경우 표층 해수는 에크만수송의 결과로 외해(동쪽)로 발산하고 그 공간을 보상하기 위해 용승현상이 발생한다.

동해안에서는 북한한류(NKCC)가 연안 저층을 따라 남하한다. 차가운 북한한류에 의한 냉수대의 형성은 용승 발생의 좋은 조건 중 하나이다 (Lee, 1983). 동해 남부에 위치한 울기 연안에서

\* Corresponding author : 051-629-6543, chungyh@pknu.ac.kr

\* 이 논문은 부경대학교 2016년도 부경대학교 연구년[II]교수 지원사업에 의하여 연구되었음(C-D-2016-0851)

수심대가 넓고 완만해지는 해저지형의 영향으로 발생하는 와류에 의해 용승이 발생되기도 한다 (Lee & Na, 1985). Byun(1989)은 냉수대가 발생하는 위치가 한국 남동해안 해안선 구조에 의해서도 결정될 수 있음을 시사하였다. 특히 동해 연안용승은 바람에 의한 영향이 크다. 남서풍이 평균 3 m/s 로 7일 이상 지속적으로 불 경우(Seung, 1974)와 평균 4 m/s 로 3일 이상 지속적으로 불 경우(Lee, 1983) 연안용승이 발생한다고 하였다.

용승해역에서는 생물활동이 활발하다. 용승해역에서 발생하는 상승류에 의해 저층에 고농도로 존재하는 영양염은 표층으로 상승하기 때문이다. 용승역의 면적은 해양 총 면적의 0.1 % 정도이나, 용승역에서의 어획량은 총 어획량의 50 % 이상으로 어업생산량이 높게 나타난다(Ryther, 1969).

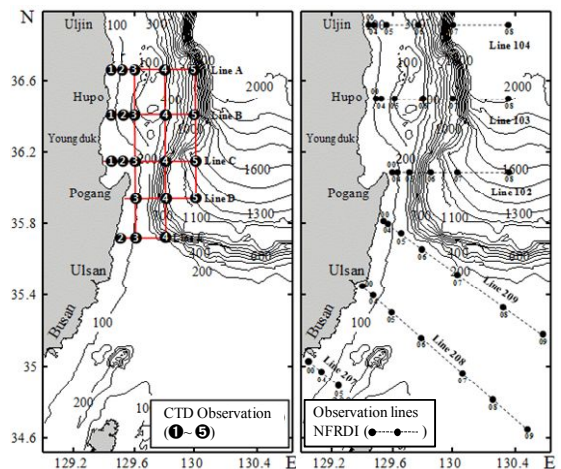
용승해역은 역학적인 측면으로 볼 때, 에너지와 물질교환이 활발하여 생물밀도의 시·공간적인 변화가 크다. 물질순환 측면에서 보면, 심층에서 영양염과 같은 물질을 공급하는 역할을 한다. 용승역을 대상으로 선행된 연구로는 국외에서 물리·생물 결합모델을 이용한 용승역의 기초생산력에 대한 연구(Gorchakov *et al.*, 2012; Liu *et al.*, 2010)등 이 있으며, 한국의 동해 연안용승역에서 위성을 이용한 일차생산력에 대한 연구(Yoo & Park, 2009; Liu & Chai, 2009)가 있다. 그러나 용승역에서 1차생산력의 기초가 되는 영양염의 시공간적 연직 분포 변화와 생산량 예측에 관한 연구는 미비한 실정이다. 그 이유로 현장에서 용승현상을 관측하는데 많은 어려움이 따른다. 기상현상에 의한 제약, 용승의 발생시기가 불규칙하여 발생 시기에 맞추어 관측하기 힘든 문제 등이 있다. 따라서 본 연구에서는 수치실험을 통하여 용승이 발생하는 한국동남해역에서 해양생태계의 기초 먹이환경을 구성하는 영양염의 시공간적인 분포를 파악하고자 한다.

## II. 자료 및 방법

### 1. 해수유동 모델

용승 발생 시기의 해수유동 특성을 파악하기 위해 POM(Princeton Ocean Model)을 사용하여 수치실험을 실시하였다(Blumberg & Mellor, 1987). POM은 외양뿐만 아니라 하구, 대륙붕 등 연안역에 주로 적용되어 왔다(Ezer *et al.*, 2002).

연구해역의 수심자료 입력을 위해 국립해양조사원에서 제공하는 전자해도를 사용하였다. 수치해도에 나타난 수심자료를 공간적으로 보간하였으며, 모델 각 격자 중심점의 수심으로 사용하였다(Fig. 1).



[Fig. 1] Location of bottom topography and observation points in East Sea of Korea.

POM은 각 격자의 수심을 동일한 간격으로 같은 개수의 층으로 나누는  $\sigma$ -coordinate를 사용하기 때문에 지형 경사가 급격하게 나타나는 해에서 계산 충돌이 발생한다. 일반적으로 수치실험에서 지형경사를 조작성하게 되면 해저면에 의한 마찰 효과가 변화되어 유동현상에 오차가 발생한다. 본 연구해역인 동해는 수심이 깊고 200 m 이상의 수심역은 큰 웅덩이 형태로 동해고유수가

존재한다. 동해 고유수는 연중 일정한 수온과 염분을 가지고 안정 상태를 유지한다. 따라서 깊은 수심에 존재하는 동해고유수가 안정하여 유동결과에 큰 영향을 미치지 않는다고 가정하고 지형경사가 급격히 변하는 200 m 수심부터 그 이상 수심까지 실제 지형 경사의 1/5로 smoothing 하였다.

수치실험 영역은 동-서(x 축), 남-북(y 축) 방향으로 150×273 km 에 해당하는 해역으로 설정하였고, 계산격자는 1000 m 의 정방격자를 사용하여 layer 개수는 총 7개로 나누었다. 1층(표층)부터 6층(저층)까지는 동일한 수심 간격으로 하였고 최 저층인 7층은 유동 계산 시 해저면에 의해 왜곡되어 나타나므로 전체 수심의 4 % 로 산정하였으며 모델 결과를 재현하는데 있어서 사용하지 않았다. 계산의 시간간격은 CFL 조건 ( $\Delta t = dx / \sqrt{2gh}$ ) 을 고려하여 external time step 은 2초, internal time step 은 15초로 15일간 계산하여 안정기간인 7일 경과 후의 유동결과를 이용하여 수평 및 연직 유동결과를 파악하였다.

연구해역의 수온·염분 값은 2013년 하계 국립수산물과학원 정선관측점의 자료를 사용하였다. 수집된 수온·염분자료를 모델 격자에 맞추어 보간하여 모델 계산에 사용하였다(Fig. 1)]. 또한 서쪽과 남쪽 외곽경계면에서 하계의 쓰시마난류(Tushima Warm Current) 유량인 3.05 Sv이 서수도(1.72 Sv)와 동수도(1.33 Sv)로 유입되고(Fukudome, 2010), 북쪽의 연안 외곽 경계면에서는 하계의 북한한류의 유량인 0.8 Sv이 유입되도록 하여 계산하였다(Kim, 2008).

동해안은 동계에 북서풍, 하계에 남풍계열의 영향을 크게 받는다. 동해안에 남서풍이 지속적으로 불 때 냉수대가 출현한다(Seung, 1974). 기존의 연구와 같이 기상청의 기상월보에 기록된 울산, 포항, 울진의 육상 기상관측소에서 최근 5년(2009~2013년)간 하계 관측 결과 또한 남서풍이 가장 높은 빈도로 나타났다.

국립수산물과학원(NFRDI)의 해양수산연구정보포

털에서 제공하는 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)위성자료에 따르면 연구해역에서 2013년 7월 용승현상이 강하게 발생하였다. 2013년 7월 포항 해상부이(기상청)의 평균풍속은 5.7 m/s 로 나타났다. 모델계산에서 해면 10 m 상공에서 부는 바람을 취송류계산에 사용한다. 포항 해상부이는 해면 4 m 상공에서 관측되었기 때문에 이를 해면 10 m 상공의 풍속으로 변환하기 위해 풍속 지수법칙으로 알려진 Sutton 방정식을 이용하였다. 변환 결과 10 m 상공의 풍속은 9.1 m/s이다.

$$U_2 = U_1 \times \left( \frac{Z_2}{Z_1} \right)^P \dots\dots\dots (1)$$

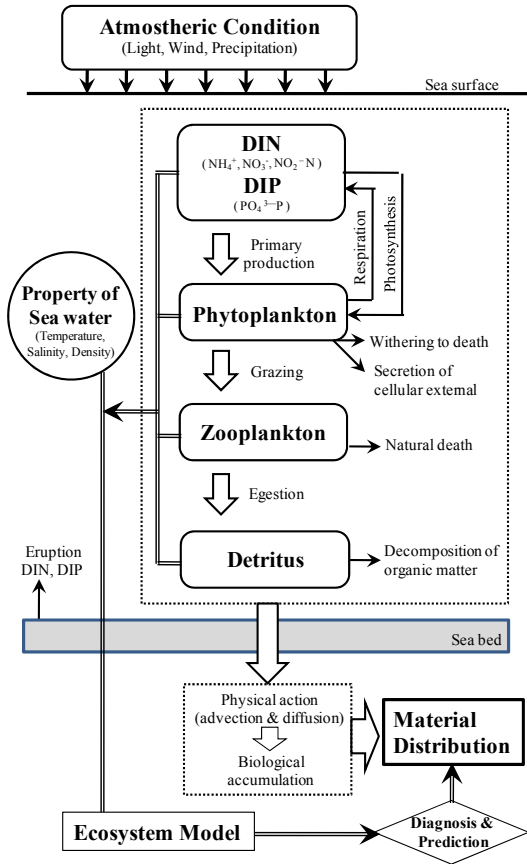
$$U_2 = U_1 \times \left( \frac{Z_2}{Z_1} \right)^{1-n} \dots\dots\dots (2)$$

여기서, Z1 : 임의의 고도(m), Z2 : 임의의 고도(m), U1 : 고도 Z1 에서의 풍속(m/s), U2 : 고도 Z2 에서의 풍속(m/s), P : 풍속할증계수(wind shear), n : 안정도 계수 (강한 안정 : 0.5, 불안정 : 0.25, 매우 불안정: 0.2) 이다. 식(1)과 (2)를 이용하여 남서풍 9.1 m/s를 모델의 전 영역에 일괄 적용 하였다.

## 2. 저차 생태계 모델

용승이 발생한 2013년 7월의 바람 남서풍 9.1 m/s 의 영향과 해류를 고려한 유동모델과 생태계 모델(COHERENS)을 접목하여 저차생태계 모델을 구동하였다. 2013년 하계 현장에서 관측한 자료를 이용하여 초기조건으로 용존산소, 영양염, 식물플랑크톤, 동물플랑크톤, detritus를 모델의 각 격자에 보간 입력하였다. 저차생태계모델의 흐름도는 [Fig. 2]와 같다.

영양염은 질소계(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) 영양염만 고려하였다. 질산염은 식물플랑크톤에 의해 소비되고 암모늄이 질산화 되는 것을 고려하였다(Table. 1, 식 N 1~8). 여기서, β<sup>(NO<sub>3</sub>)</sup> 는 수주(water column) 속의 질산염 농도변화량(mmol N/day), NO<sub>u</sub> 는 식



[Fig. 2] Material distribution related to the lower trophic environments.

물플랑크톤에 의한 질산염 흡수속도(mmol N/mmol C-day),  $NH_r$  는 암모늄의 질산화율(1/day),  $NH_S$  는 암모늄의 농도(mmol N),  $NO_{u_{max}}$  는 질산염 최대흡수율(0.2-0.6 mmol N/mmol C-day),  $k_{NOS}$  는 질산염흡수 반포화상수(0.32 mmol N/m<sup>3</sup>),  $k_i$  는 암모늄에 의한 질산염 흡수억제상수(0.5-7.0 mmol N/m<sup>3</sup>),  $Q_{max}$  는 탄소에 대한 질소 최대 할당량 (0.15-0.25 mmol N/mmol C),  $NH_{r_{max}}$  는 최대질산화율(0.1/day),  $O$ 는 산소 농도(mmol O/m<sup>3</sup>), 그리고  $O_{1/2}$  는 산소 반포화상수(30 mmol O/m<sup>3</sup>)이다.

암모늄 농도는 식물플랑크톤에 의한 흡수와 질산화에 의해 감소, 동물플랑크톤에 의한 배출과 detritus에서 분해되는 부분에 의해 증가되는 것으로 계산하였다(<Table. 1>, 식 N 9~14).

<Table. 1> Formulation of each biological process

Component	Num.	Formulation
Nutrient	N 1	$\beta(NOS) = -NO_u + NH_r \cdot NH_S$
	N 2	$NO_u = NO_{u_{max}} f(T) f(NOS) f_1(NHS) f_2(Q)$
	N 3	$NO_{u_{max}} = NO_{u_{max}} (1 - \eta)$
	N 4	$f(NOS) = NOS / (k_{NOS} + NOS)$
	N 5	$f_1(NHS) = (1 + NH_S / k_i)^{-1}$
	N 6	$f_2(Q) = 1 - (Q - q_n) / (Q_{max} - q_n)$ , $f_2(Q) = 0$ , $Q > Q_{max}$
	N 7	$Q_{max} = Q_{max} (1 - \eta) + q_n \eta$
	N 8	$NH_r = f(T) NH_{r_{max}} (O / O_{1/2} + O)$
	N 9	$\beta(NHS) = -(NH_u B + NH_r \cdot NH_S) + e_7 GN + M_r M$
	N 10	$NH_u = NH_{u_{max}} f(T) f(NHS) f_3(Q)$
	N 11	$NH_{u_{max}} = NH_{u_{max}} (1 - \eta)$
	N 12	$f(NHS) = NH_S / (k_{NHS} + NH_S)$
	N 13	$f_3(Q) = 1 - (Q - q_n) / (Q_{max} - q_n)$
	N 14	$M_r = f(T) M_{r_{max}} (1 - \frac{M_q C}{M_q C_{min}})^2$ , $M_q C \geq M_q C_{min}$ $M_r = 0$ , $M_q C < M_q C_{min}$
phyto-plankton	P 1	$phytoplakton = phytoplakton + growth - grazing$ $\beta(B) = (\mu - C) B$
	P 2	$\mu = \min[\mu_1(I_p), \mu_2(Q)]$
	P 3	$\mu_1(I_p) = (\alpha I_p^X q_n^N (Q - q_n) - r_0) / (1 + b)$
	P 4	$\mu_2(Q) = \mu_{max} f(T) (1 - Q_{min} / Q)$ , $Q \geq Q_{min}$ $\mu_2(Q) = 0$ , $Q < Q_{min}$
	P 5	$Q_{sol} = (1 - alb) \cdot F \cdot \max(0, \sin(2\pi(t_h - 5.5) / 24))$
	P 6	$F = (a_1 + a_2 \sin((t_d / 365 + 281.7 / 360) 2\pi)) \cdot Q_1$
	P 7	$Q_1 = (1 - 0.62 cloud + 0.0019 sun h)$
	P 8	$grazing = R_{max} (1 - e^{-\tau phy})$
	P 9	$R_{max} = 0.024 e^{(0.12z)}$
zoo-plankton	Z 1	$\beta(Z) = GZ\gamma(1 - e) - dZ$
	D 1	$\beta(M) = (1 - \gamma) GN - M_r M$
	D 2	$\beta(C) = (1 - \gamma) GB - C_r C$
	detritus	D 3
D 4		$f(O) = \frac{O}{O_{1/2} + O}$
Dissolved Oxygen	DO 1	$\beta(O) = (O_q^B \mu + O_q^{NO} \cdot NO_u - O_q^{C_e} \gamma) B - O_q^{NH} \cdot NH_r \cdot NH_S - O_q^C \cdot C_r C$

여기서,  $\beta(NHS)$  는 수주내의 질산염 농도변화량 (mmol N/day),  $NH_u$  는 식물플랑크톤에 의한 암모

흡수속도( $\text{mmol N/mmol C-day}$ ),  $e$  는 배설물중 질소비(0.5),  $\gamma$  는 동물플랑크톤에 의한 포식 비율(0.8),  $N$ 은 식물플랑크톤의 질소농도( $\text{mmol N/m}^3$ ),  $M_r$  는 detritus의 무기질화율( $\text{day}^{-1}$ ),  $M$  은 detritus의 질소농도( $\text{mmol N/m}^3$ ),  $NH_{u_{max}}$  는 최대 암모늄흡수율( $1.5 \text{ mmol N/mmol C-day}$ ),  $k_{NHS}$  는 암모늄 흡수반포화상수( $0.24 \text{ mmol N/m}^3$ ),  $M_{r_{max}}$  는 detritus 질소의 최대 무기질화율( $0.08/\text{day}$ ),  $M_q^C$  는 detritus의 탄소에 대한 질소 비( $\text{mmol N/mmol C}$ ) 그리고  $M_{q_{min}}^C$  는 detritus의 탄소에 대한 질소 최소비( $0.09 \text{ mmol N/mmol C}$ )이다.

부유성 식물플랑크톤의 증가요인으로는 광합성에 의한 성장이 있다. 감소요인으로는 동물플랑크톤에 의해 섭이되어 감소하도록 계산하였다(<Table. 1>, 식 P 1). 여기서  $\beta(B)$  는 식물플랑크톤 탄소변화량( $\text{mmol C/day}$ )이고,  $\mu$  는 성장률( $\text{day}^{-1}$ ),  $G$ 는 포식압( $\text{day}^{-1}$ ),  $B$ 는 식물플랑크톤의 탄소생체량( $\text{mmol C}$ )이다.

빛이나 영양염에 의해 부유성 식물플랑크톤의 성장이 제어된다는 Cell Quota Threshold Limitation (CQTL) 이론(Droop *et al.*, 1985)에 근거를 두고 성장률을 산출하였다(Table. 1, 식 P 2~4). 여기서  $\mu_1(I_p)$  는 빛에 의한 성장률( $\text{day}^{-1}$ )이다.  $\alpha$  는 광합성효율( $0.23 \text{ mmol C m}^2/\text{mg Chl-day-W}$ ),  $I_p$  는 광량(W),  $x_{qN}$  는 클로로필의 질소화율( $2 \text{ mg Chl/mmol N}$ ),  $Q$ 는 식물플랑크톤의 질소/탄소비( $\text{mmol N/mmol C}$ ),  $q_n$  는 탄소에 대한 질소비( $0.18 \text{ mmol N/mmol C}$ ),  $\eta$  는 식물플랑크톤에 대한 종속영양비(0.3),  $r_0$ 는 호흡율,  $b$ 는 호흡기울기(respiration slope) 이다. 그리고  $\mu_2(Q)$  는 영양염에 의한 성장률( $\text{day}^{-1}$ ),  $\mu_{max}$  는 최대성장을 그리고  $f(T)$ 는 온도성장함수( $e^{0.07(T-20)}$ ) 이다.

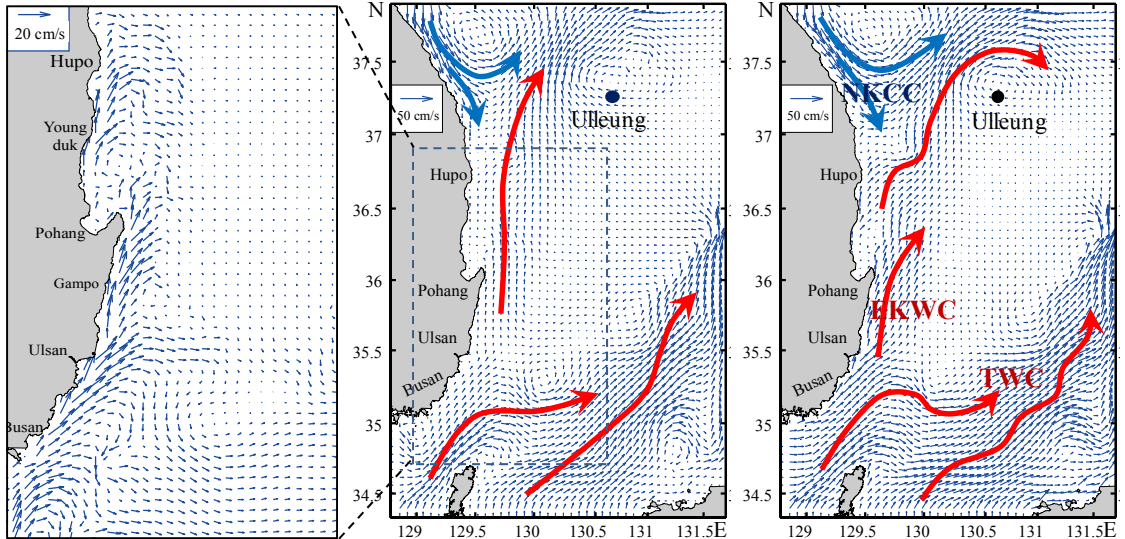
식물플랑크톤의 성장에 빛이 큰 영향을 미친다. 광량은 대상해역의 위도와 시간(계절별, 시간별)에 다르게 해수면에 도달되도록 하였으며, 구름에 의해 광이 차단되는 효과도 고려하였다. 해수면에 도달한 빛은 해수중의 플랑크톤과 detritus

에 의해 수심에 따라 빛이 감소하도록 하였다(<Table. 1>, 식 P 5~7). 여기서  $Q_{sol}$  은 해수면에 입사하는 태양광량( $\text{W/m}^2$ ),  $alb$ 는 해면 albedo(0.06),  $t_h$  는 시간(hour),  $F$  는 당일 정오시 태양광량,  $a_1$  은 연평균 태양광량,  $a_2$  는 위도에 따른 태양광 변동값,  $t_d$  는 해당일,  $Q_1$  는 구름에 의한 태양광 차단율,  $cloud$ 는 구름비율,  $sun h$ 는 태양 남중시 고도(degree)이다.

감소요인으로 동물플랑크톤에 의해 포식되는 양을 계산하였다. 포식에 대한 감소율은 Petipa(1966)가 제시한 수온에 따른 동물플랑크톤의 최대섭식량을 고려하였다. 그러나 자연계에서는 먹이 밀도와 종류 등 다양한 요인에 의해 최대 섭식량이 저하된다. 먹이 밀도에 따른 섭식량은 지수함수적인 특징을 갖는다는 Ivlev(1945)의 식을 참고하여 동물플랑크톤에 의한 식물플랑크톤의 피식율을 계산하였다(<Table. 1>, 식 P 8, 9). 여기서,  $R_{max}$  는 수온변화에 따른 최대섭식률(Petipa, 1966),  $phy$  는 식물플랑크톤 밀도( $\text{mg C/L}$ ),  $t$ 는 수온( $^{\circ}\text{C}$ ) 이다.

동물플랑크톤의 생체량 증가요인으로 식물플랑크톤의 섭식을 고려하였고, 감소요인으로 사망만을 고려하였다(<Table. 1>, 식 Z 1). 여기서,  $G$  는 식(P 8)과 식(P 9)의 식물플랑크톤의 포식압이고,  $Z$  는 동물플랑크톤의 생체량이다.  $d$  는 사망률( $0.05/\text{day}$ )을 말하며, 다른 생물체에 포식되는 부분과 자연사망을 고려한 것이다.

유기쇄설물(organic detritus)은 배설물, 생물사체, 유기소비산물 등 이다. 수중 속에서 빛의 산란 및 흡수에 관여하며 무기질화 과정을 통해 암모늄을 생성하고, 침강하여 해저에서 저서생물에 의해 소비되며 해수유동에 따라 재부유하기도 한다. Detritus의 증가요인으로는 식물플랑크톤의 피식량 중 섭취되지 않은 질소량과 탄소량, 감소요인은 무기질화 되어 빠져나가는 질소량과 탄소량을 계산하였다(<Table. 1>, 식 D 1~4).



[Fig. 3] Distribution of wind-driven currents (left), density-driven currents (central) and residual currents (right) in the East Sea of Korea.

여기서,  $\beta(M)$ ,  $\beta(C)$  는 detritus의 질소와 탄소의 변화량( $\text{mmol N(C)/day}$ ),  $C$  는 detritus의 탄소농도 ( $\text{mmol C/m}^3$ ),  $c_{r_{\max}}$  는 detritus 탄소의 최대무기질 화율( $0.06/\text{day}$ )이다.

용존산소는 식물플랑크톤의 광합성에 의해 생성되고, detritus 분해(산화)와 질산화과정 그리고 생물호흡에 의해 소비되도록 하였다(<Table. 1>, 식 DO 1). 여기서,  $\beta(O)$  는 산소농도변화량,  $o_q^B$  는 광합성에 의한 산소/탄소 비( $1.0 \text{ mmol O/mmol C}$ ),  $o_q^{NO}$ 는 식물플랑크톤 질산염 흡수에 의한 산소/질소 비( $2.0 \text{ mmol O/mmol N}$ ),  $o_q^C$  는 detritus 분해에 의한 산소/탄소 비( $1.0 \text{ mmol O/mmol C}$ ) 그리고  $o_q^{NH}$  는 질산화 과정에 의한 산소/질소 비 ( $2.0 \text{ mmol O/mmol N}$ )이다.

계산한 모델 결과 중 영양염( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ )의 시간에 따른 수평 및 연직적인 분포를 파악하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 유동 분포

남서풍  $9.1 \text{ m/s}$  를 적용한 표층 취송류 결과를

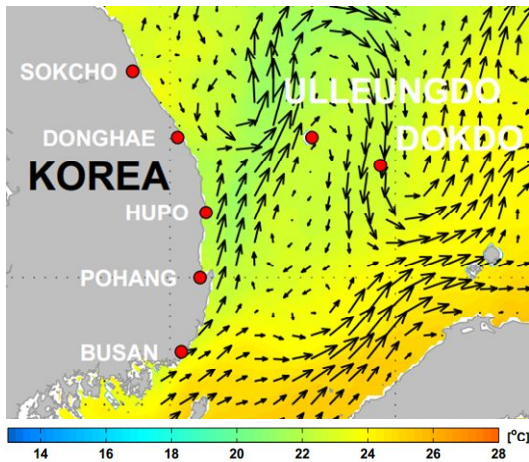
[Fig. 3]에 도시하였다. 한국 동해 연안을 따라 북동향 하는 흐름이 뚜렷하게 나타났다. 이는 남서풍에 의한 영향으로 표층해수가 외해로 발산하는 결과이다. 남서풍에 의해 동해 연안을 따라 북향 하는 흐름은 울산과 후포 앞바다에서 시계방향의 소규모 와류(eddy)를 형성하였다.  $200 \text{ m}$  이상의 수심을 보이는 외양역에서 취송류의 흐름은 약  $2 \text{ cm/s}$  이하로 약하게 나타난다.

수온·염분 및 해류의 영향을 고려한 밀도류의 표층흐름을 보면([Fig. 3]), 쓰시마난류의 영향이 뚜렷하게 나타났다. 대한해협을 지나가는 쓰시마난류의 주 흐름은 일본 연안을 따라 진행한다. 대한해협 서수도를 지나가는 흐름은 쓰시마를 지나 동향하며 일부는 한국 연안을 따라 북향 하는 약한 흐름을 볼 수 있다. 한국 연안을 따라 북향하는 흐름은 북쪽에서 강릉 연안을 따라 남향하는 북한한류를 만나 동쪽으로 편향되고 울릉도를 중심으로 시계방향으로 돌아 외양으로 향한다.

바람 및 밀도 효과를 모두 고려한 잔차류의 표층 흐름을 계산하였다([Fig. 3]). 바람의 영향을

포함하지 않은 밀도류와 잔차류는 유사한 흐름을 보인다. 그러나 잔차류가 밀도류에 비해 한국 연안에서 북동향하는 흐름이 약 3~8 cm/s 강하게 나타났다. 즉 한국 연안에서의 바람에 대한 효과가 뚜렷하게 작용하고 있는 것을 파악할 수 있었다.

국립해양조사원에서 제공하는 2013년 7월 동해 표층평균해류도([Fig. 4])와 해수유동모델 표층 잔차류 결과를 비교해 보았다. 모델 결과는 쓰시마난류와 동해연안을 따라 북상하는 동한난류(East Korean Warm Current), 속초부터 동해연안을 따라 남하하는 흐름, 울릉도 주변을 시계방향으로 돌아나가는 울릉난수소용돌이 등 해수 흐름의 형태를 잘 재현하였다. 그리고 해양관측을 통해 획득된 과학적 지식에 기반하여 만든 동해 해류도에 나타나는 해류의 흐름과 유사한 결과를 보인다 (Park *et al.*, 2013).



[Fig. 4] Satellite image of average SST and currents vector in July, 2013 by KHOA.

2013년 7월 동해 표층평균해류도에 비해 모델 결과의 유속이 작게 나타난다. 또한 모델 결과에서 울릉도를 돌아나가는 울릉난수소용돌이는 2013년 7월 평균해류도에 비해 낮은 위도에 형성된다. 이는 쓰시마난류의 흐름은 남쪽 외곽경계에서 유입되는데 그 힘이 후포 연안까지 미치지

못한 결과로 판단된다. 본 연구에서 구동한 모델 영역은 광범위하고 외곽경계면의 폭이 넓다. 따라서 경계에서 유입되는 흐름의 힘이 모델 내부까지 전달되지 못하여 실제 동해에서 나타나는 해수의 흐름을 섬세하게 구현해 내는 부분에 있어서 부족한 점이 있다.

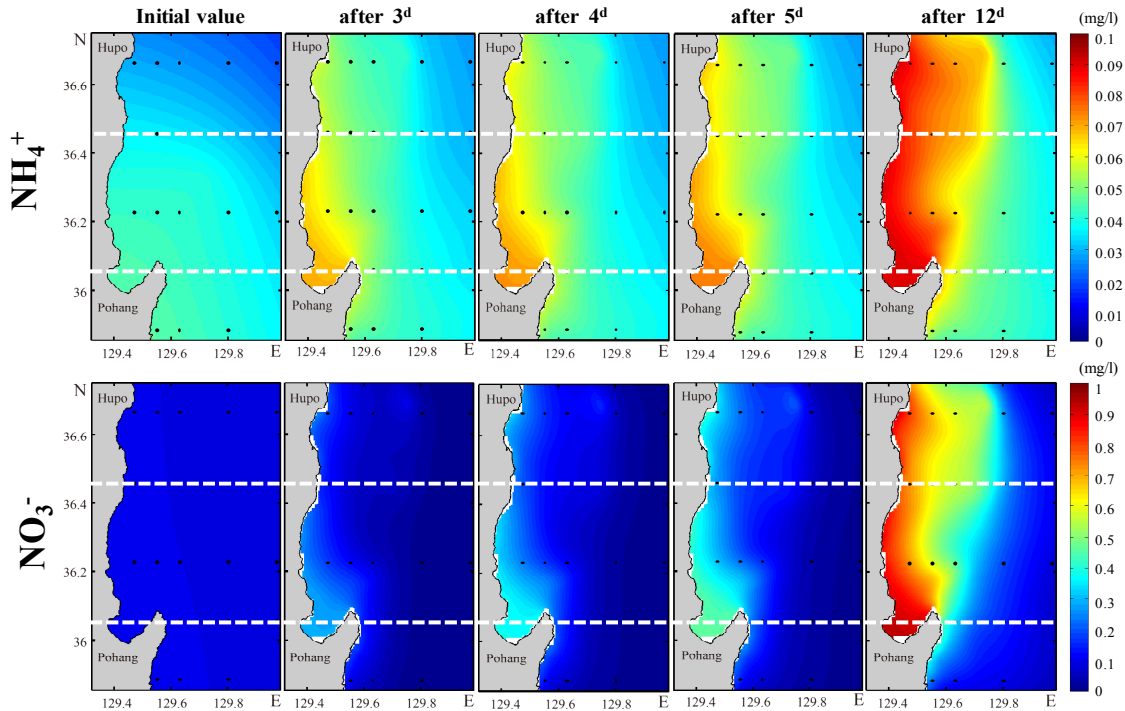
## 2. 영양염 분포

생태계 모델에 입력된 초기 조건부터 12일 경과 후 까지 표층 암모늄과 질산염의 분포를 [Fig. 5]에 나타내었다. 암모니아의 시공간적인 분포를 보면 생태계모델 구동 후 3일이 경과되었을 때 포항~영덕연안 까지 0.06 mg/L 이상의 농도를 보이며 외양으로 갈수록 점차 낮아지는 경향이 나타났다. 생태계모델 구동 후 4일이 경과되었을 때 포항~영덕 연안에서 암모늄의 농도가 0.07 mg/L 이상으로 나타났고, 연안에서 점차 외양으로 퍼져나가는 형태의 분포를 보였다. 12일 경과 후 포항과 후포 전 연안역에서 암모늄은 0.09 mg/L 이상의 높은 농도를 보인다.

질산염의 시공간적인 분포를 보면 생태계모델 구동 후 2일이 경과되었을 때 전반적으로 0.2 mg/L 이하의 낮은 농도 분포를 보였으며, 연안에서 비교적 높고 외양에서 낮은 경향을 보였다. 생태계모델 구동 후 4일이 경과되었을 때 포항~영덕연안까지 0.4 mg/L 이상의 농도를 보였고, 암모늄의 분포와 유사하게 연안에서 점차 외양으로 퍼져나가는 형태의 분포를 나타내었다. 12일 경과 후 포항과 후포 전 연안역에서 질산염은 0.8 mg/L 이상의 높은 농도를 보이며 암모늄과 유사한 분포 형태를 보인다.

용승류 발생에 의한 암모늄과 질산염의 연직 분포 특성을 파악하기 위해 정선 A와 정선 B를 기준으로 시공간적 연직 분포도를 나타내었다 ([Fig. 6]). 암모늄과 질산염 모두 저층에 고농도로 분포하고 있으며 시간이 흐를수록 연안역의 영양염 농도가 증가하는 경향을 보인다. 연안역

수치실험에 의한 한국 동해 연안용승해역의 영양염 분포 특성



[Fig. 5] Horizontal distribution of  $\text{NH}_4^+$ (upper) and  $\text{NO}_3^-$ (lower) over 12 days from the initial value.

표층의 영양염 농도는 초기에 비해 3배 이상 증가하였으며 영양염의 동일농도 분포선이 해저 지형의 기울기에 점점 유사하게 분포한다.

Onitsuka et al. (2007)에 의하면 물리-생태계 결합모델을 통해 한국 동해연안에서 연안용승 발생 시기인 하계 영양염의 농도가 상승하며 일차 생산력이 높게 나타난다고 하였으며, Gorchakov et al. (2012)는 아프리카 서쪽에서 발생하는 Canary 연안용승역을 대상으로 용승시기 영양염이 증가하여 일차생산력이 상승함을 물리-생태계 결합모델로 수치실험을 하였다. 이와 같이 본 연구에서 수행된 수치실험에서 영양염의 농도가 연안역에서 높고 외양역에서 낮게 나타나는 형태가 유사하다.

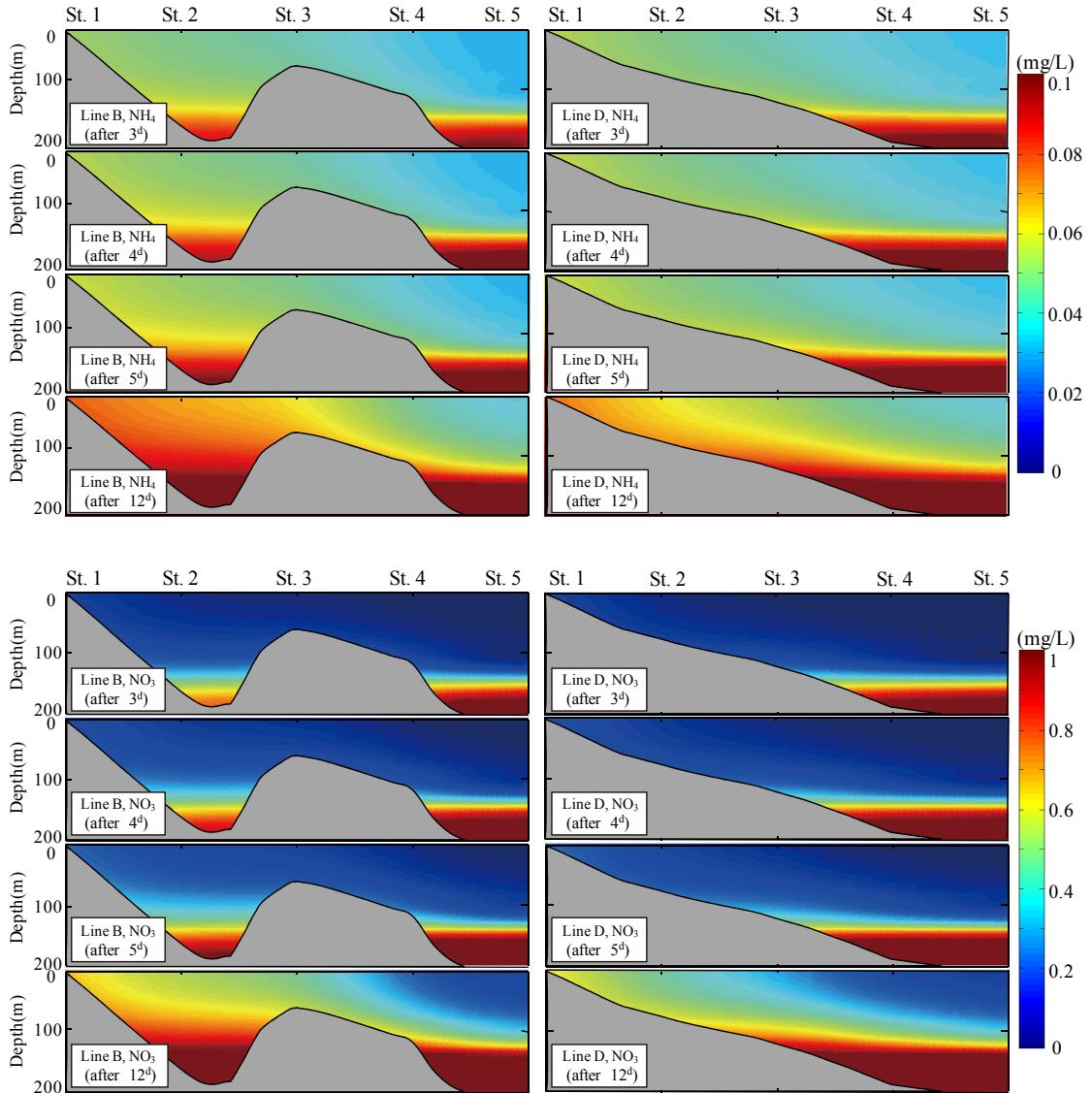
용승에 의해 영양염이 저층에서 표층으로 부상하는 양을 정량적으로 파악하기 위해 정선 B와 D의 St. 1 표층에서 시간 변화에 따른 암모늄과 질산염의 농도 변화를 <Table 2>에 나타내었다.

<Table 2> Concentrations of nutrients (mg/L) over time in the coastal zone of the line B and D

		Initial	3day	4day	5day	12day
$\text{NH}_4^+$	line B	0.038	0.054	0.058	0.062	0.087
	line D	0.041	0.05	0.054	0.056	0.06
$\text{NO}_3^-$	line B	0.18	0.20	0.25	0.31	0.74
	line D	0.18	0.20	0.21	0.22	0.32

영덕 연안 표층에서의 암모늄의 농도는 초기값인 0.038 mg/L에서 점차 증가하여 12일 경과 후 0.087 mg/L 로 약 2.2배 증가하였고 질산염의 농도는 0.18 mg/L에서 0.74 mg/L로 약 4.1배 증가하였다. 구룡포 앞바다 표층 암모늄의 농도는 초기값인 0.041 mg/L에서 12일 경과 후 0.06 mg/L로 약 1.5배 증가하였고 질산염의 농도는 0.18 mg/L에서 0.32 mg/L로 약 1.8배 증가하였다.





[Fig. 6] Vertical distribution of  $\text{NH}_4^+$ (upper) and  $\text{NO}_3^-$ (lower) over 12 days at line B and D.

Son *et al.* (2008) 에 의하면 용승이 발생하는 해역에서 비교적 얇은 수심에 영양염층이 형성되고 주변해역에 비해 영양염의 농도가 높게 나타난다고 하였다. 그리고 Kwon *et al.* (2014) 은 용승이 나타난 2011년 9월 후포와 포항 연안에서 영양염 관측을 실시한 결과 외양에 비해 연안역에서 영양염의 농도가 높게 나타났다고 하였다.

선행된 용승역의 연구와 비교해 볼 때 관측된 시기와 장소가 달라 영양염 농도의 차이는 있으나, 연안용승 발생시 영양염의 분포 형태 및 특성은 본 연구에서 모델을 통해 잘 표현해 낸 것으로 판단된다.

본 연구에서 울진과 포항을 포함하는 용승발생 가능성이 있는 연안역을 대상으로 관측을 실시하

였고 관측된 자료를 이용하여 생태계모델에 적용하였다. 용승 발생 시 후포에서 울릉도 방향으로 유출되어 나가는 유동모델 결과와 같이 넓은 해역을 대상으로 수치실험이 진행된다면 용승된 영양염이 표층에서 외해로 확산되는 과정과 그 경로까지 파악할 수 있을 것으로 판단된다.

현재 우리나라 주변 해역에서 해양생태계 모델을 위한 생화학적 환경 인자에 대한 DB가 체계적으로 구축되어있지 않는 상황이다. 즉 생·화학적인 해양환경인자들을 모델에 적용하기 위해서는 예를 들어 mole 농도나 생물의 개체수 등이 무게 단위로 계산되어야 한다. 또한 용승 발생해역의 양질의 결과를 모델로 구축하기 위해서는 현장의 기상, 수온 및 염분, 해류 등의 물리환경 뿐만 아니라 생·화학적인 환경 인자에 대한 지속적인 관측의 DB가 구축되어야 한다.

#### IV. 결론

한국 동해남부 연안에서 바람이 주요인으로 작용하여 발생하는 용승현상이 영양염 분포에 미치는 특성을 파악하기 위하여 수치실험을 실시하였다. 수치실험은 해수유동모델(POM)과 생태계모델(COHERENS)을 접목하여 함께 구동하였다.

용승이 강하게 발생한 2013년 7월 평균 풍속인 남서풍 9.1 m/s 의 해상풍을 적용하여 취송류를 계산하였다. 또한, 바람 및 밀도(수온·염분, 해류) 효과를 고려한 잔차류는 쓰시마난류, 동한난류, 울릉난수소용돌이 등의 흐름을 잘 재현하였다.

또한 동해 남동부 연안에서 용승발생시기 영양염의 시공간적 분포를 파악하였다. 초기조건부터 시간의 흐름에 따라 포항~영덕 연안역에서 표층 영양염의 농도가 점차 증가하였다. 저층에 고농도로 축적된 영양염은 용승류에 의해 해저면을 따라 표층으로 상승한다. 표층으로 부상된 영양염은 점차 북동향하여 외해로 확산된다.

본 연구에서는 용승발생 가능성이 높은 해역에 중점을 두고 수치실험을 진행하였다. 추후 한국

동해에서 광역의 해역을 대상으로 용승에 대한 연구가 진행될 필요가 있다. 이를 위해서는 대상해역의 물리환경 요인 만 아니라 생화학적 환경인자에 대한 체계적이고 정량적인 자료가 필요하다.

#### References

- Blumberg A. F. & G. L. Mellor(1987). A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. In : Three dimensional Coastal Models (N. S. Heaps, ed.), American Geophysical Union, Washington, D.C., : 1~16.
- Byun, S. K.(1989). Sea surface cold water near the southeastern coast of Korea: Wind effect. The journal of the oceanological society of Korea, 24(3), 121~131.
- Droop M. R.(1985). Fluorescence & the light-nutrient interaction in Monochrysis. Journal of the Marine Biological Association of United Kingdom, 65 : 221~237.
- Ezer T. · H. Arango & A. F. Shchepetkin(2002). Developments in terrain-following ocean models: intercomparisons of numerical aspects, Ocean Modelling, 4 : 249~267.
- Fukudome, K. I. · Yoon, J. H. · Ostrovskii, A. · Takikawa, T. & Han, I. S.(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), 539~551.
- Ielev, V. S.(1945). The biological productivity of waters. Uspekhi Sovrem. Biol. 19 : 98~120.
- Kwon H. K. · Oh S. J. · Park M. O & Yang H. S. (2014). Distribution of water masses and distribution characteristics of dissolved inorganic and organic nutrients in the southern part of the East Sea of Korea: Focus on the observed data in september, 2011. Journal of the Korean Society for Marine Environment and energy. 17(2), 90~103.
- Lee & Na(1985). Structure of upwelling off the southeast coast of Korea. J. Oceanol. Soc. Korea, 20, pp. 6~19.
- Lee, J. C.(1983). Variations of sea level and sea

- surface temperature associated wind-induced upwelling in the southeast coast of Korea in summer. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 18: 149~160.
- Liu, G. & Chai, F.(2009). Seasonal and interannual variation of physical and biological processes during 1994 - 2001 in the Sea of Japan/East Sea: a three-dimensional physical - biogeochemical modeling study. *Journal of Marine Systems*, 78(2), 265~277.
- Liu, K. K. · Chao, S. Y. · Lee, H. J. · Gong, G. C. · & Teng, Y. C.(2010). Seasonal variation of primary productivity in the East China Sea: A numerical study based on coupled physical-biogeochemical model. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 57(19), 1762~1782.
- Onitsuka, G. · Yanagi, T. & Yoon, J. H.(2007). A numerical study on nutrient sources in the surface layer of the Japan Sea using a coupled physical ecosystem model. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 112(C5).
- Park K. A. · Park J. E. · Choi B. J. · Byun D. S. & Lee E. I.(2013). An oceanic current map of the East Sea for science textbooks based on scientific knowledge acquired from oceanic measurements, *Journal of Koreans Society of Oceanography* 18(4), 234~265.
- Petipa, T. S.(1966). Relationship between growth, energy metabolism, and ration in *A. clausi*. *Physiology of Marine Animals*, Akad. Nauk, USSR, Oceanographical Commission, : 82~91.
- Ryther, J. H.(1969). Photosynthesis and fish production in the sea, The production of organic matter and its conversion to higher forms of life vary throughout the world ocean, *Science*, 166, pp. 72~76.
- Seung, Y. H.(1974). A dynamic consideration on the temperature distribution in the east coast of Korea in August. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 9 : 52~58.
- Son J. W. · Kim K. H. · Kim M. J. · Son S. K. · Hwang K. C. & Park Y. C.(2008). Distribution and remineralization Ratio of inorganic nutrients in the divergence zone(7°~10.5°N), Northeastern Pacific. *Journal of the Korean Society of Oceanography*, 13(3), 178~189.
- V. A. Gorchakov · V. A. Ryabchenko · N. A. Diansky & A. V. Gusev(2012). Modeling the seasonal variability of marine ecosystem in the region of the central-eastern atlantic. *Oceanology*, 52(3), 322~334.
- Yoo, S. & Park, J.(2009). Why is the southwest the most productive region of the East Sea/Sea of Japan. *Journal of Marine Systems*, 78(2), 301~315.

- 
- Received : 24 August, 2017
  - Revised : 08 September, 2017
  - Accepted : 25 September, 2017