

진동만의 빈산소수괴 형성기구

김동선 · 김상우^{1*}

부경대학교 해양산업개발연구소
^{1*}부경대학교 위성정보과학연구소

Mechanism of Oxygen-Deficient Water Formation in Jindong Bay

DONG-SUN KIM AND SANG-WOO KIM^{1*}

Research Center for Ocean Industrial Development, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea
^{1*}Institute of Satellite Information Science, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

하계 진동만 저층수의 저산소화에 미치는 성층 및 바람의 효과를 고려한 수평 및 연직 유동성분의 영향을 조사하여 내만역에서의 빈산소수괴 형성기구를 밝혔다. 진동만에서 수온, 염분, 용존산소 및 풍향, 풍속은 1998년 3월부터 1999년 2월 사이에 조사하였다. 저층수에서 5 이하의 낮은 용존산소농도가 5월에서 9월에 걸쳐 존재하였으며, 표층수의 고온·저염화에 따라 강한 약층이 형성되어 연직기울기는 매우 크게 나타난 하계(7~8월)에 3 이하의 극히 낮은 용존산소농도가 출현하였다. 이와 같은 저농도의 용존산소는 특히 만 안쪽 정점에서 춘계(5~6월)에도 관찰되었다. 또한, 하계(8~9월)에 5 이하의 낮은 용존산소농도를 가지는 저층수가 약 4~6 m 수층까지 표층쪽으로 부상하는 특징적인 현상이 나타났다. 여름철 진동만에서 바람의 효과를 고려한 잔차류의 연직성분을 살펴보면, 이 지역에서 우세한 북풍이나 서풍계열의 바람에 의해서 만 바깥쪽은 하강류역이, 만 안쪽은 상승류역이 발생한다. 또한, 하강류역인 만 바깥쪽에서 만 안쪽으로 향하는 저층류가 발달하였는데, 이것은 표층으로부터 침강된 유기물질의 만 안쪽으로의 유입을 초래할 수 있을 것으로 기대된다. 한편 만 안쪽에서 나타나는 상승류의 존재가 만 안쪽에서 형성된 저층의 빈산소수를 표층 근처까지 부상하게 하는 역할을 하는 것으로 보인다.

The influences of horizontal and vertical flow components including the stratification of water column and the wind field on the formation of oxygen-deficient water in summer in Jindong Bay, northern part of Chinhae Bay, were examined. Temperature, salinity and dissolved oxygen in seawater, and direction and velocity of wind were observed in Jindong Bay from March 1998 to February 1999. Low concentration of 5 mg/L in dissolved oxygen (DO) appeared at the bottom layer from May to September. Extremely low DO concentration less than 3 mg/L was investigated in summer (July to August) when stratification was strongest due to abrupt vertical gradients of temperature and salinity in water column. Bottom waters with the extremely low DO concentration were observed even in spring (May to June) at the inner part of the bay. In summer (August to September), the bottom waters with the low DO concentration (less than 5 mg/L) existed at the water depth from 4 to 6 m, being moved upward to the surface layer compared to other seasons. Vertical components of residual flow, calculated by the direction and velocity of wind, in Jindong Bay in summer showed that locally prevailed northerly and westerly wind resulted in downwelling flow at the outer part of the bay and conversely, upwelling at the inner part of the bay. In addition, bottom current at the outer part corresponding to the downwelling area directed to the inner part, probably resulting in a transport of the particulate organic matter settled at the bottom waters to the inner part of the bay. The oxygen-deficient watermass, which was formed at the bottom layer of the inner part, was likely to be transported to the surface layer by the upwelling flow.

Key words: Oxygen-deficient water, Residual flow, Downwelling, Upwelling flow

서 론

바다에서 수중 용존산소(dissolved oxygen: DO) 농도는 이류·확산 및 생·화학적인 과정에 수반되는 산소의 공급량과 소비량

의 평형에 의해서 결정된다. 저층수 및 저질의 산소소비가 조화롭게 이루어지고 산소공급이 원활하면, 저층의 용존산소는 감소하지 않는다. 연안역에서 발생하는 빈산소수괴는 저층환경의 유기물 분해에 의한 산소소비의 증대와 해수의 정체에 의한 산소공급의 감소에 의하여 발생하고 특히, 육상으로부터의 유기물의 유입·퇴적이 활발한 부영양화 수역에서 흔히 나타난다. 이와 같은 빈산소

*Corresponding author: swkim@mail1.pknu.ac.kr

수괴의 출현에 대한 연구는 연안역에서 어장환경을 평가하거나 악화된 환경 개선을 위한 지표로써 수산생물학적으로 매우 중요하다. Takeoka (1989)는 일본 세토내해에서 빈산소수괴 형성을 물리적인 과정에 의한 간단한 Box모델을 사용한 해수교환의 관점에서 조석류가 탁월한 곳에서의 산소 결핍은 수심이 깊을수록 크다는 것을 밝혔다. 또한, Sasaki(1989)는 미카와만의 입구 저층에서 입자상유기물의 분해가 빈산소수괴 형성의 주요 원인이 된다는 결론을 얻었다. 하계 연안역은 밀도류가 발달하는 경우가 많고, 용존산소의 공급은 수평 및 연직혼합에 의하여 이동되어 진다. 일본의 동경만에서는 성층기인 하계에 저층의 저온·고염분인 빈산소수괴가 북풍에 의한 외적인 작용에 의하여 표층으로 용승하여 수산생물에 영향을 준다고 한다(Matsuyama *et al.*, 1990).

현재, 빈산소수괴에 대한 연구 대상은 “저질 표면물질의 생·화학적 산화과정 중에서 어떤 부분이 빈산소화를 위한 주요한 산소소비 과정인가?”에 대한 것과 “용존산소 농도가 어느 정도 낮아지면 어떠한 생물에 영향을 끼치는가?” 등의 생·화학적인 분야에 관심이 많다. 빈산소수괴에 대한 물리적인 해석은 성층강도의 수평 및 연직성분을 포함한 유동장에 의한 산소수송의 효과와 발생위치와의 관계를 구명하기 위해 현장의 관측 및 수치모델을 이용하고 있다(Kuramoto and Nakata, 1991; Nakata and Kuramoto, 1992; Takasugi *et al.*, 1996). 국내에서는 진해만과 원문만에서 저산소수괴 출현과 경년변화에 대한 Hong *et al.*(1991) 및 이(1991)의 보고가 있으며, 최 등(1991) 및 최(1993)에 의한 용존산소 수지의 저장능력 및 물질순환 모델을 이용한 용존산소수지 해석을 통한 환경관리기법에 대한 연구결과가 제시되기도 하였다.

본 연구에서는 성층의 강도에 의한 밀도류나 바람에 의해서 발생하는 취송류 등 잔차류의 수평적 흐름과 연직류에 기인한 빈산소수괴의 분포와 변동을 밝히고자 하였다. 따라서, 성층기인 하계를 중심으로 만 전체적으로 저층수에서 저산소화가 나타나는 진

해만 북서부에 위치한 진동만을 대상으로 하여 빈산소수괴 출현에 성층의 강도 및 바람의 효과를 고려한 수평적·연직적 유동성분의 영향에 대하여 조사하였다.

용존산소의 시·공간적분포 특성

진동만의 5개 정점(Fig. 1)에서 1998년 3월부터 1999년 2월까지 1년간 평균 1주일 간격으로(1998년 11월 12월 및 1999년 1월과 2월은 기상악화로 각각 1회 및 1998년 10월은 미 실시) 수온, 염분, 밀도 및 용존산소를 조사하였다. 만 안쪽(정점 C1, C5), 중앙부(정점 C2) 및 바깥쪽(정점 C3: 만입구, C4: 만의 서쪽)에서의 1998년 3월부터 1999년 2월까지 수온, 염분, sigma-t 및 용존산소농도의 연직분포를 Fig. 2에 나타내었다. 수온, 염분 및 sigma-t의 약층은 4월말부터 약하게 형성되기 시작하여 하계에는 수심 4 m 부근에서 강하게 형성하다가 11월에는 파괴되기 시작하였다. 용존산소 농도는 추·동계에는 전 수층이 10 mg/L 이상의 고농도로 분포하고 있으며, 하계 저층에서 3 mg/L의 극히 낮은 산소농도가 나타나고 있다. 특히 만 안쪽(정점 C1)에서는 수심 4 m의 표층 근처에서도 저층에 3 mg/L의 낮은 용존산소의 존재가 확인되었다. 수온, 염분, sigma-t 및 용존산소농도의 시·공간적 분포를 보면, 3 mg/L 이하의 낮은 용존산소농도는 주로 약층이 강하게 형성되는 하계(7월~8월)에 저층에 존재하며, 만 안쪽(정점 C1)에서는 5월과 6월에도 저층에서 확인할 수 있었다. 약층이 형성되는 하계의 경우 표층에서 고온·저염, 저층에서는 저온·고염이 되어서 연직 기울기는 매우 크게 나타났다. 특히 춘계(5월)에는 표·저층간 sigma-t의 차이가 하계보다 작게 나타나지만, 만 안쪽의 저산소화는 sigma-t를 구성하고 있는 성분 중 수온이 염분의 성분보다 비율이 크기 때문에 나타난 현상으로 판단된다. 즉, 염분의 저하가 비교적 작더라도 높은 일사량에 의한 강한 수온 성층으로 인

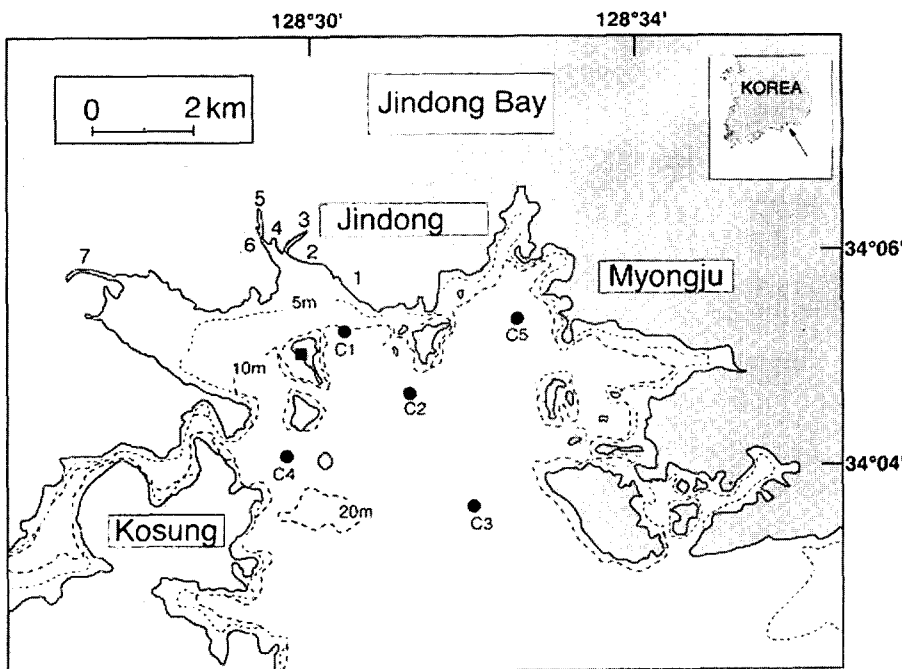


Fig. 1. The oceanographic observation points in the Jindong Bay. Depths are in meters. ●: observation points, ■: meteorological station (Songdo), 1: Jindong 1, 2: Jindong 2, 3: Jindong 3, 4: Tabongchun, 5: Jindongchun, 6: Ingokchun, 7: Jinjunchun.

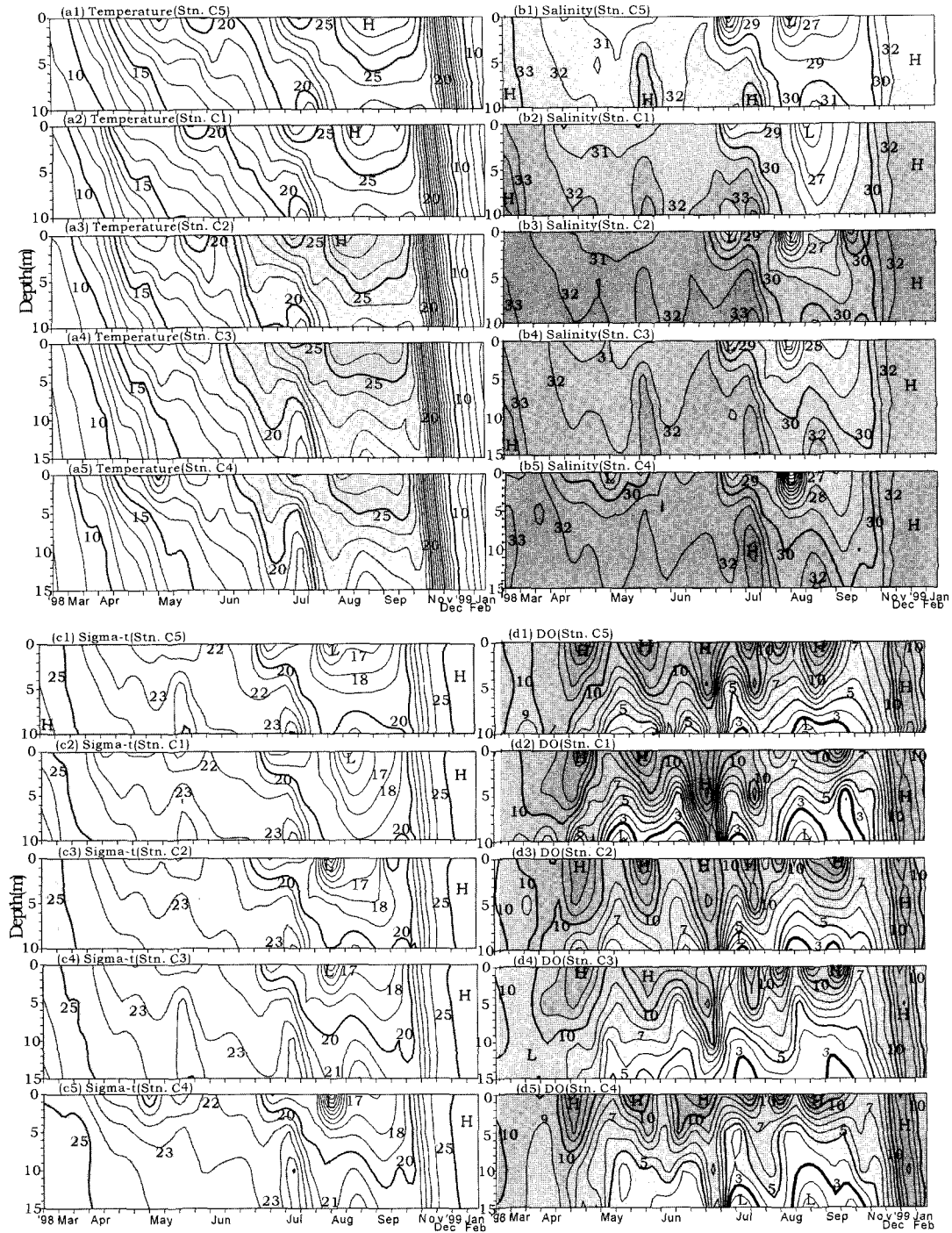


Fig. 2. Temporal variations of vertical profile of temperature ($^{\circ}\text{C}$), salinity (psu), sigma-t and dissolved oxygen (DO; mg/L) at Stn. C5, C1, C2, C3 and C4 from March 1998 to February 1999.

하여 수심이 얇은 천해에서도 연직 혼합은 일어나지 않는다.

Iizuka and Min(1989)는 일본의 오무라만에서 5 mg/L 대의 용존산소층을 기준으로 하여, 그 이천에서는 산소 생산층으로 그 이심에서는 산소 소비층으로 구분하여 설명하였는데, 본 연구해역에서 이와 같은 산소 생산층과 산소 소비층은 시·공간적인 변화 양상을 나타내었다. 진동만에서 하계에 5 mg/L의 낮은 용존산소농

도가 나타나는 수심은 약 4~6m이며, 이 형성대는 다른 계절에 비하여 표층쪽으로 부상되는 특징적인 현상으로 볼 수 있다(Fig. 2). 밀도성층이 발달하고 육상에서 유입되는 영양염의 증가로 인하여 식물플랑크톤의 광합성이 활발한 하계에는 생산층에서 생산된 식물플랑크톤의 사멸로 발생하는 유기물이 저층으로 침강하는 과정에서 분해에 의해서 수층의 산소가 소비된다(과학기술부, 2000).

또한 Iizuka and Min(1989)은 이 과정에서 다량의 영양소를 함유하고 있는 퇴적물로부터의 재용출과 중층수에서의 공급에 의해서 적조 원인종의 성장 촉진물질도 함께 공급 될 수 있다고 하였다. 한편, 저층에서는 밀도성층으로 인하여 표층으로부터 산소공급이 작아지므로 빈산소 혹은 무산소상태가 출현할 수 있게 된다. 이상의 결과들은 저층에서 출현하는 빈산소수괴는 주로 성층기인 하계에 발생한다는 것을 잘 나타내어 주었지만, 빈산소수의 형성과 분포에 미치는 수평적인 이류나 연직류의 영향은 설명하기가 어렵다. 따라서 밀도의 효과 및 바람의 영향을 고려한 잔차류의 수평적인 이류나 연직류를 이용한 물리적인 해석으로 하계 진동면에서 빈산소수괴의 형성 및 분포를 설명 할 필요가 있다.

잔차류 계산

성층에 의한 밀도류와 바람의 세기에 의한 연직혼합이 빈산소수괴의 거동에 미치는 영향을 파악하기 위하여 수평 및 연직방향에 대한 흐름을 계산하였다.

본 연구해역에서 계산격자는 수평적으로 300×300 m의 정방격자로 계산되는 총 격자수는 1232(44×28)로 구성하였다. 하계 산소 생산층과 산소 소비층의 구분은 수심 약 4~6 m에서 형성하기 때문에 연직적으로는 산소 생산층을 표층(0~2 m), 산소 소비층을 저층(8 m~bottom) 그리고 그 중간대를 중층(2~8 m)으로 하는 3층으로 분할하여 각 층에서 잔차류(residual flow)를 계산하였다. 연안조건으로는 흐름이 경계를 가리지 못하도록 하였으며, 경계면에서 경계에 평행한 성분은 non-slip condition을 적용하였다. 또한, 외해 경계역에서는 수온과 염분의 변화가 없도록 하였다. 잔차류 운동을 지배하는 기초방정식은 아래와 같으며, 밀도류는 본질적으로 경압(baroclinic)적인 구조를 갖고 있기 때문에 계산은 3차원으로 행하였다(Yanagi *et al.*, 1996).

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U\frac{\partial U}{\partial x} + V\frac{\partial U}{\partial y} + W\frac{\partial U}{\partial z} - fV = -\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial P}{\partial x} + A_h\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + A_h\frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + A_v\frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + S_x \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U\frac{\partial V}{\partial x} + V\frac{\partial V}{\partial y} + W\frac{\partial V}{\partial z} - fU = -\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial P}{\partial y} + A_h\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + A_h\frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + A_v\frac{\partial^2 V}{\partial z^2} + S_y \quad (2)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + U\frac{\partial W}{\partial x} + V\frac{\partial W}{\partial y} + W\frac{\partial W}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial P}{\partial z} - \frac{\rho_s}{\rho_0} + A_h\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + A_h\frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + A_v\frac{\partial^2 W}{\partial z^2} \quad (3)$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

$$P = g\eta + \int_0^z Bdz \quad (5)$$

$$B = \frac{\rho_0 - \rho}{\rho} g \quad (6)$$

$$S_x = -\left(u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y}\right), \quad S_y = -\left(u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y}\right) \quad (7)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U\frac{\partial T}{\partial x} + V\frac{\partial T}{\partial y} + W\frac{\partial T}{\partial z} = K_h\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K_h\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + K_v\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \gamma(T^* - T) \quad (8)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + U\frac{\partial S}{\partial x} + V\frac{\partial S}{\partial y} + W\frac{\partial S}{\partial z} = K_h\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + K_h\frac{\partial^2 S}{\partial y^2} + K_v\frac{\partial^2 S}{\partial z^2} + \gamma(S^* - S) \quad (9)$$

$$\rho = f(T, S) \quad (10)$$

여기서, U, V, W 는 각각 x, y, z 방향의 유속성분, S_x, S_y 는 조석 응력(tidal stress)라 하고 $(-)$ 는 조류 평균값으로 조류(u, v)의 비선형 항이 조석 잔차류를 구동하는 것을 나타내고 있다. P 는 압력, g 는 중력가속도, η 는 평균 해수면 상의 수위, ρ_0 는 연직 평균밀도, γ 는 관측한 수온과 염분(T^*, S^*)과 계산한 수온, 염분(T, S) 값과의 편차를 방지하기 위하여 도입한 항으로 본 연구에서는 수온과 염분의 현장값에 의한 유동계산이로써 $\gamma(0.5/\Delta, \Delta)$: 계산의 시간간격) 값을 적용하였다. $f(T, S)$ 는 비선형 상태방정식, A_h, A_v 는 수평·연직외점성계수, K_h, K_v 는 수평·연직외확산계수이다. 수평외점성 및 확산계수인 A_h 와 K_h 는 조석혼합이론에 의하여 조류진폭의 2승에 비례하는 형태를 고려하여서 식 (11)과 같이 사용하였다.

$$A_h = K_h = \frac{C}{\pi} U_{amp}^2 T \quad (11)$$

여기서, $T(=12$ 시간 25분)는 M_2 조류의 1주기, $C(=0.2)$ 는 1주기 간의 이동수괴가 혼합하는 경우, U_{amp} 는 M_2 조류의 진폭을 표시하고 있다. 이 식에 의하면, 진동면에서의 A_h 와 K_h 는 만 바깥쪽에서는 약 $10^5 \text{ cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$, 만 안쪽에서는 약 $10^3 \text{ cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$ 정도가 된다. 또한, 연직외점성계수 및 연직외확산계수인 A_v 와 K_v 는 Munk and Anderson(1948)의 관수를 수정하여 식 (12)과 (13)과 같이 나타내었다.

$$A_v = \frac{A_0}{(1+aRi)} \alpha + A_b \quad (12)$$

$$K_v = \frac{K_0}{(1+bRi)} \beta + K_b \quad (13)$$

중립상태의 연직점성계수와 연직확산계수는 $A_0=K_0=5 \text{ cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$ 이고 다른 변수는 Munk and Anderson(1948)에 의해서 Ri 는 Richard number, $a=10, b=3.33, \alpha=0.5, \beta=1.5, A_b=K_b=0.5 \text{ cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$ 이다.

해면 $z = \eta(x, y)$ 에서의 경계조건은 식 (14)-(15)과 같다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial x} + U\frac{\partial \eta}{\partial x} + V\frac{\partial \eta}{\partial y} - W = 0 \quad (14)$$

$$-K_v\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{Q_s}{C_p\rho_0}, \quad \frac{\partial S}{\partial z} = 0 \quad (15)$$

$$\tau_x = \rho_a C_a W_x (W_x^2 + W_y^2)^{1/2}, \quad \tau_y = \rho_a C_a W_y (W_x^2 + W_y^2)^{1/2} \quad (16)$$

여기서, C_p 는 해수의 비열, Q_s 는 해면을 통한 열 flux(+: heating, -: cooling), τ_x, τ_y 는 바람응력의 x, y 성분, W_x, W_y 는 풍속의 x, y 성분, $\rho_a(=0.0012 \text{ g cm}^{-3})$ 는 공기의 밀도, $C_a(=0.0013)$ 는 해면의 저항계수를 나타내고 있다. 해저 $z = -h(x, y)$ 의 경계조건은 식 (17)-(19)와 같다.

$$U \frac{\partial h}{\partial x} + V \frac{\partial h}{\partial y} - W = 0 \quad (17)$$

$$K_h \left(\frac{\partial h \partial B}{\partial x \partial x} + \frac{\partial h \partial B}{\partial y \partial y} \right) + K_v \frac{\partial B}{\partial z} = 0 \quad (18)$$

$$A_v \frac{\partial U}{\partial z} = \gamma_b U (U^2 + V^2)^{1/2}, \quad A_v \frac{\partial V}{\partial z} = \gamma_b V (U^2 + V^2)^{1/2} \quad (19)$$

함편, 육지와 접한 지역에서는 식 (20)과 같은 경계조건을 사용하였다.

$$U = V = 0 \quad (20)$$

여기서 $\gamma_b (=0.0026)$ 는 해저마찰계수를 나타내고 있다. 조석 잔차류는 식 (7)에 의해서, 취송류의 효과는 경계조건 식 (16)에 의해서 본 연구해역의 송도(Fig. 1에 ■로 표시)에 기상관측장비 AWS(Automatic Weather System: AANDERRA Inc.)를 설치하여 수집한 1998년 5월(0.30 m/s, NNE), 8월(0.64 m/s, NE), 11월(2.49 m/s, SE) 및 1999년 2월(3.16 m/s, ESE) 평균값을 이용하여 계산했다. 또한 밀도류의 효과는 경계조건 식 (15)로부터 운동방정식

과 압력경도력의 변화에 의해서 계산하였다.

또한, 바람의 세기와 방향에 따른 변화를 조사하기 위하여 풍향별(E, W, S 및 N) 및 추계와 동계의 평균 유속(추계: 약 3.00 m/s, 동계: 약 4.00 m/s)을 이용하여 빈산소수가 발생하는 하계(8월)의 수온과 염분의 조건에서의 영향을 파악하기 위하여 잔차류의 연직방향성분을 계산하였다.

유동장에 따른 해석

Fig. 3은 춘·하·추·동계의 각 계절을 대표하는 1998년 5월, 8월, 11월 및 1999년 2월의 표층(수심 1m), 중층(수심 5m), 저층(수심 10m)에서 평균 용존산소농도의 수평분포를 나타낸 것이다. 춘계(5월)와 하계(8월) 만 안쪽(C1 및 C5)의 저층에서 3 이하의 저산소현상이 있으며, 특히 하계(8월)에는 빈산소수괴(용존산소 2 이하)가 나타나고 있다. 이와 같이 만 안쪽에 나타나는 빈산소현상을 해석하기 위한 한가지 방법으로 산소 포화층 이천 층과 이심 층에 대한 수평방향의 유동속도를 파악할 필요가 있다.

진동만에서 행한 잔차류 계산의 타당성은 Kim et al.(2002)과

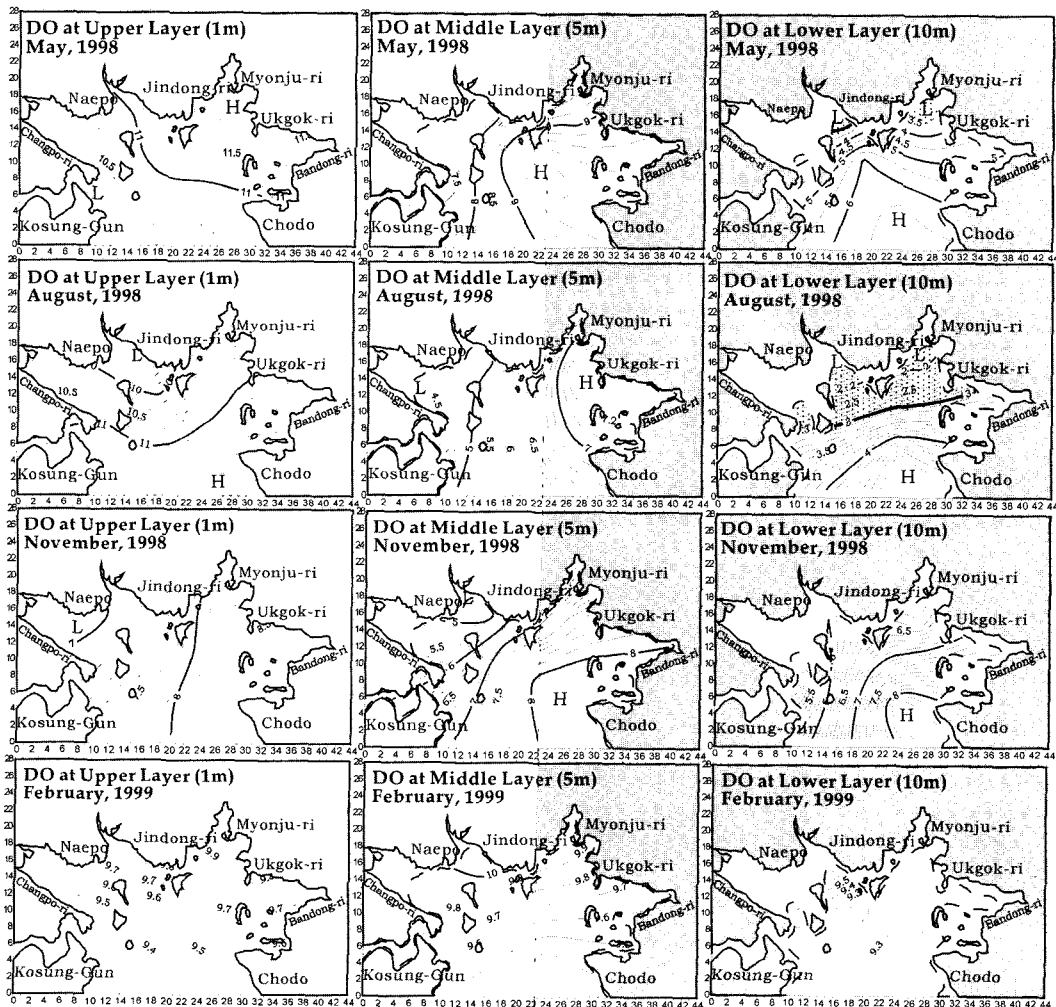


Fig. 3. Horizontal distributions of dissolved oxygen (DO; mg/L) at upper (left column), middle (center column) and lower layer (right column) in May, August, November 1998 and February 1999.

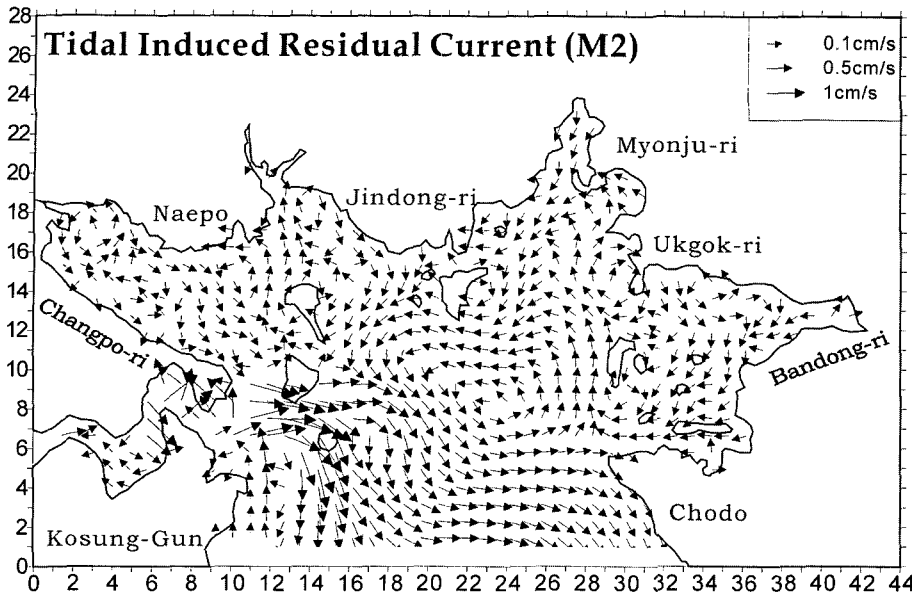


Fig. 4. Pattern of tidal induced residual current (M2) in Jindong Bay.

김(2003)에 의해서 흐름의 크기와 방향을 비교하여 계산한 잔차류와 현장의 유동성분의 재현성을 검정하였다. 먼저 이 지역에서 우세하게 나타나는 M₂분조의 조석 잔차류를 보면, 만 중앙부에서 반시계방향의 환류가 발생하고 있다. 조석 잔차류는 고성군과 창포리 중간지점 앞바다(정점 C4)에서 약 1.1 cm/s 정도로 다른 지역에 비하여 조금 큰 유동양상을 보이고 있으나, 대체적으로 조석 잔차류의 세기는 미약하게 나타났다(Fig. 4). 하계 만 바깥쪽(정점 C3, C4)의 수심 10 m 이심에서 빈산소수괴를 볼 수 있었으며, 이것은 수평적인 잔차류의 흐름양상으로는 설명되지 않는다. 만 바깥쪽(정점 C3, C4)의 수심이 15~20 m로 다른 지역보다 수심이 깊으며 조석 잔차류가 탁월한 지역이다. 수심이 깊을수록 수평적인 분산계수는 작아지며, 성층이 강한 하계에는 연직교환이 나빠져서 용존산소의 소비속도가 증대되고 저층에서 산소부족현상으로 인한 저산소화가 발생한다. 이와 같은 현상을 Takeoka(1989)는 일본의 히우치 앞바다에서 해수교환에 대하여 조석류가 탁월한 흐름역에서의 산소 결핍은 수심이 깊을수록 심하게 진다는 것을 수치모델로써 설명하였다. 그러나 진동만과 같은 천해역에서의 조석 잔차류는 순압적인 특성을 갖고 있기 때문에 정확한 표층과 저층간의 흐름의 양상을 파악할 수 없는 단점이 있다.

따라서, 조석 잔차류, 수온과 염분 및 바람의 효과를 고려한 표층(수심 1 m), 중층(수심 5 m) 그리고 저층(수심 10 m)에서의 잔차류를 계산하였다(Fig. 5). 춘(5월)·하계(8월)와 추계(11월) 및 동계(2월)의 잔차류 유동형태는 다르게 나타나고 있다. 표층에서의 흐름 양상을 보면 바람의 세기가 미약한 5월과 8월(각각 0.30 m/s, NNE; 0.64 m/s, NE)은 수온과 염분의 크기에 따른 밀도류의 형태를 보이고 있지만, 11월과 2월(각각 2.49 m/s, SE; 3.16 m/s, ESE)은 바람의 효과에 의한 유동형태를 반영하고 있다. 이와 같은 현상은 Fig. 2에서 볼 수 있는 수온·염분 및 sigma-t의 시·공간적 분포에서도 잘 나타난다. 즉, 5월과 8월은 전 수역이 수온과 염분에 의해 성층을 형성하고 있지만 11월과 2월은 표층과 저층의 수온·염분 및 sigma-t가 거의 균질하고 바람에 의한 표층

의 잔차류를 볼 수 있다.

하계(8월)의 잔차류를 보면, 표·중층에서는 만으로부터 유출하고, 저층은 유입하는 형태로 나타나고 있다(Fig. 5). 표·중층에서 나타나는 남하류는 진동만의 저질분포, 빈산소수괴 형성에 큰 영향을 준다. 즉 하천이 많은 만 안쪽의 유입역에서 생산된 유기물질이 표층의 흐름에 의해서 남하하면서 서서히 침강하여 저층에 운반된다(김 등, 2001). 저층에 침강된 유기물이 저층류에 의하여 만 안쪽으로 유입되어서 만 안쪽의 저층 환경을 악화시키며, 저층의 유기물 분해에 의한 산소 소비로 인하여 빈산소화가 발생한다는 것으로 설명할 수 있다. 추(11월)·동계(2월)의 잔차류는 표·저층간의 밀도차가 작아지기 때문에 내부모드(경압) 현상의 전파속도도 작아지고 바람의 효과에 의한 흐름의 양상이 나타난다. 즉 잔차류는 표층에서는 만으로 유입하고 중·저층에서는 유출하는 연직적으로 순환하는 형태로 나타난다.

해역에서 빈산소수괴의 발생은 연직·수평혼합에 의하여 결정되는 것으로 알려져 있다(Takasugi, 1996). Isobe et al.(1993)는 일본 Suo Sea 수심 7 m 이천에서는 용존산소의 공급의 약 80%가 연직확산과정에서 그리고 약 20%가 수평이류확산과정에 의하여 결정된다고 보고하였다. 따라서, 하계 진동만 수심 10 m 이천에서 발생하는 빈산소수괴를 해석하기 위해서는 잔차류의 수평적인 이류성분과 더불어 연직류에 대한 연구가 필요할 것으로 보인다. 바람의 효과를 고려하지 않았을 경우와 관측한 바람성분을 고려한 춘(5월)·하계(8월) 및 추계(11월)와 동계(2월) 잔차류의 연직성분을 계산한 결과를 Fig. 6(a) 및 (b)에 나타내었다. 춘(5월)·하계(8월)에 빈산소수괴가 발생하는 만 안쪽(정점 C1)은 상승류(upwelling flow)역이 나타나고, 만 바깥쪽은 하강류(downwelling flow)가 우세하게 나타났다. 만 바깥쪽 하강류역의 존재는 만 안쪽에서 공급된 유기물을 저층으로 침강시킬 수 있는 역할을 하게 되며, 저층에 침강된 유기물은 만 바깥에서 안쪽으로 유입하는 저층류에 의하여 수송되어 질 것이다. 한편 만 안쪽으로 수송된 유기물은 육상에서 유입되는 유기물과 함께 축적되어서 대량의 산

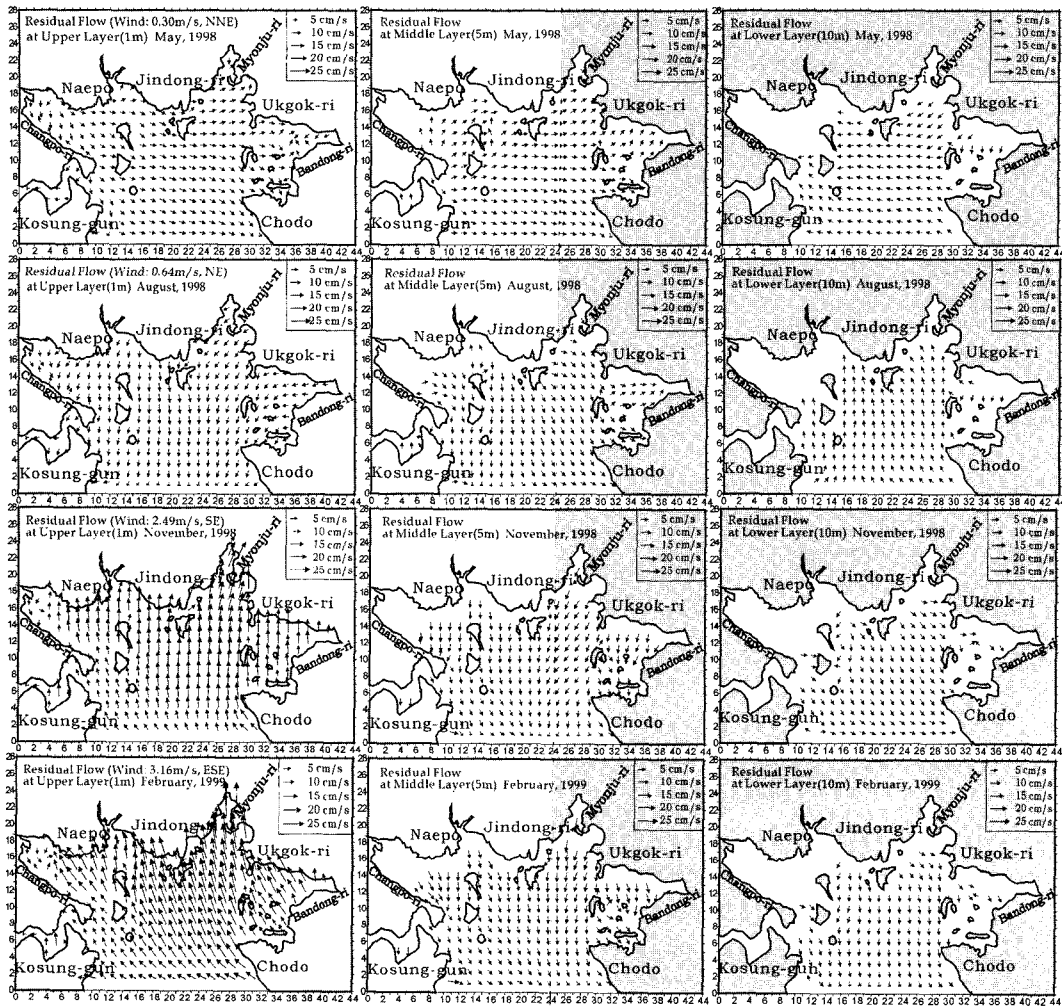


Fig. 5. Horizontal distribution of residual flow considering the effect of wind (May: 0.30 m/s, NNE, August: 0.64, NE, November: 2.49, SE, 1998 and February: 3.16 m/s, ESE, 1999) at the upper (left column), middle (center column) and lower layer (right column) in Jindong Bay.

소소비를 유발할 수 있다. 만약 만 안쪽에 빈산소수괴가 존재한다면, 상승류의 영향으로 인하여 빈산소수괴가 표층 근처까지 상승할 수 있다. 이와 같은 현상은 하계에 만 안쪽에서 형성되는 3~5 저산소층의 존재가 수심이 약 4~6 m까지 표층쪽으로 부상되어 있는 원인으로 설명할 수 있다(Fig. 2).

한편, 진동만과 같은 내만의 유동은 바람의 영향을 강하게 받게 된다. 하계 바람은 동계에 비교하여 태풍 등의 강풍으로 인하여 변화가 크게 나타난다. 특히, 진동만에서의 바람은 인근의 마산이나 통영에서와 다른 형태로 나타났다. 즉, 하계 마산이나 통영에서 관측한 바람자료는 남풍계열이 우세하나 진동만에서는 북풍계열의 바람이 우세하게 나타났다(Kim et al., 2002). 바람의 방향이나 세기에 따라 연직류가 미치는 공간적인 범위가 달라지며 상승류나 하강류에 의한 빈산소수괴 형성에 대한 다른 해석도 가능할 것이다(Sasaki, 1989; Matsuyama et al., 1990; Kuramoto et al., 1991; Nakata and Kuramoto, 1992; Isobe et al., 1993). 따라서, 빈산소수괴가 형성되는 하계의 수온·염분 분포조건 상에서 무풍, 관측한 바람을 고려할 때 바람을 동풍, 서풍, 남풍 및 북풍의 4방향에서 추계나 동계에 관측한 평균 바람 3.00 m/s와 4.00 m/s 조건

으로 하여 연직류를 계산하였다(Fig. 6, 7). 바람의 효과를 고려하지 않았을 경우 또는 미약한 상태의 관측 바람을 고려한 경우나 추계나 동계에 관측한 평균 바람 각각 3.00 m/s, 4.00 m/s의 북풍이나 서풍의 바람이 불었을 경우 수심 10 m 이천인 만 안쪽에서 상승류역이 나타났다. 또한, 이 시기에 만 바깥쪽에서는 하강류역이며, 바람의 세기와 방향의 영향으로 상승류나 하강류역의 공간적 분포는 변화를 보이고 있으며, 북풍이나 서풍의 바람 세기를 수록 만 안쪽에서 발생하는 상승류역의 공간적 분포가 크게 나타난다.

이상의 결과로부터 하계 진동만 안쪽에서 발생하는 빈산소수괴는 수평적 이류나 연직류에 의해서 다음과 같은 가설로 설명할 수 있다. 빈산소수괴 형성에는 용존산소의 공급과 소비 균형의 결과에 따라 계절적으로 형성과 해소를 반복하게 나타나고 있다. 이와 같은 현상을 지배하는 것은 육상에서 유입되는 부하물질이 일부는 침강하면서 북풍이나 서풍의 바람에 의하여 남하하게 된다. 만 안쪽에서 외부로 수송되는 유기물질은 만 바깥쪽에 존재하는 하강류로 인하여 저층으로 침강하고 침강한 유기물질은 저층에서 발생하는 잔차류의 유입에 의하여 만 안쪽으로 수송되며, 이것은

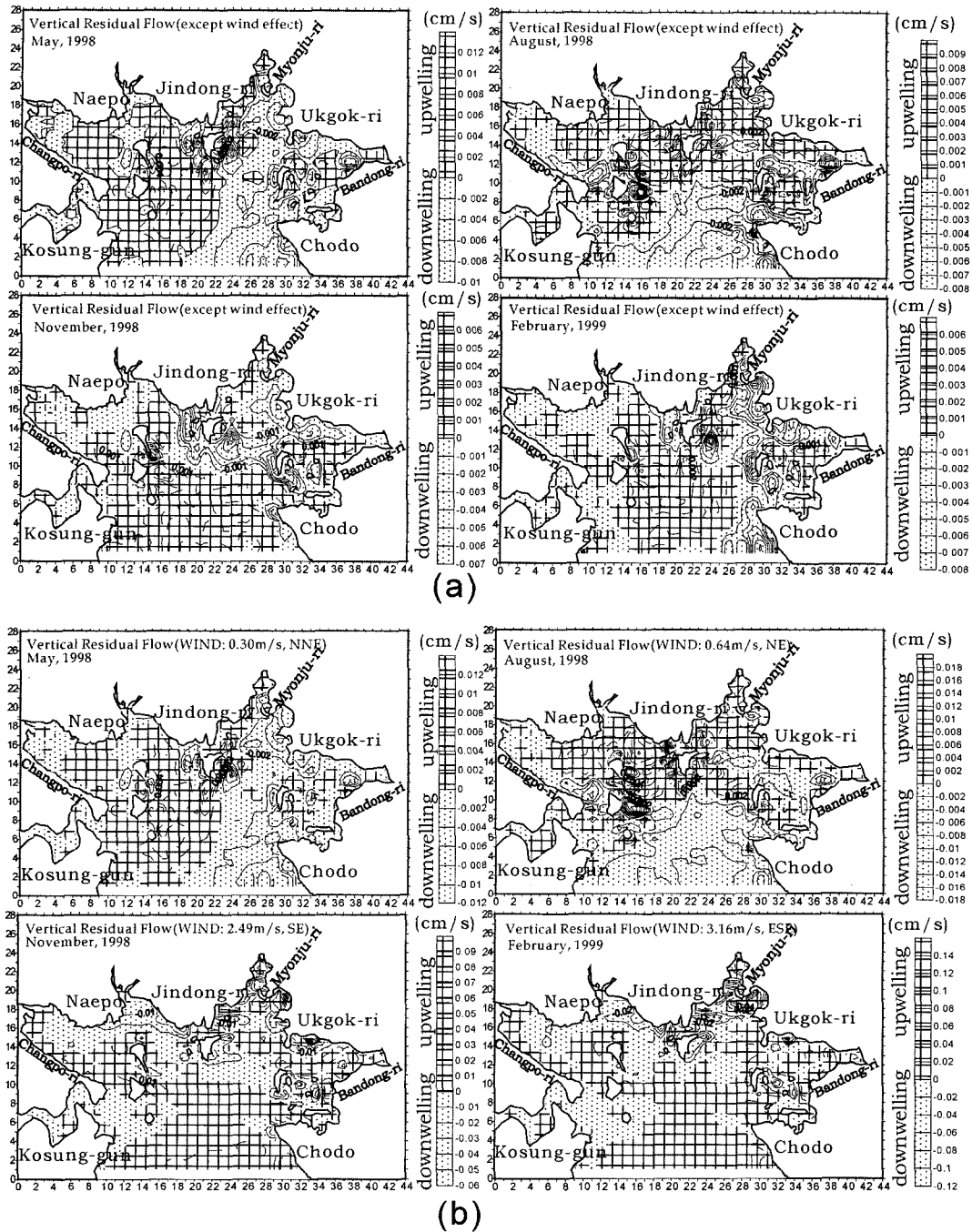


Fig. 6. (a) Averaged vertical residual flow except wind effect. (b) Averaged vertical residual flow considering the effect of wind (May: 0.30m/s, NNE, August: 0.64, NE, November: 2.49, SE, 1998 and February: 3.16 m/s, ESE, 1999) in Jindong Bay.

육상에서 유출되는 유기물질과 함께 축적되어 나타난다. 따라서, 만 안쪽 저층의 유기물은 하계의 밀도성층과 유기물질 분해에 의하여 산소가 소비되고 산소부족 현상을 가져와서 빈산소수괴가 형성되며, 저층에 존재하는 빈산소수괴는 이 지역에서 발생하는 상승류에 의하여 표층 근처까지 부상하게 된다는 것이다.

하계 진동만 안쪽 수심 10 m 이천에서 발생하는 빈산소수괴는 성층이 강하게 형성되어서 용존산소 공급이 저하되고 저질의 생·화학적 용존산소 소비량의 증가에 의해서 나타나는 빈산소수층

이 형성되어 진다. 한편 이 지역에서 발생하는 상승류에 의해서 저층에 존재하는 빈산소수층이 표층 가까이까지 나타난다. 또한, 수심 15 m 이심인 만 바깥쪽에서는 수평적인 이류 및 연직류에 의한 산소공급 정도가 빈산소수괴 형성에 관련이 있는 것으로 설명할 수 있다. 이것은 진동만과 비슷한 환경조건을 갖고 있는 일본 Suo Sea에서 천해역과 그 보다 깊은 곳의 이류성분, 연직성분 및 산소소비속도를 계산하여 밝힌 현상으로부터 설명이 가능하다 (Isobe *et al.*, 1993). 따라서, 진동만에서 빈산소수괴 형성기구의

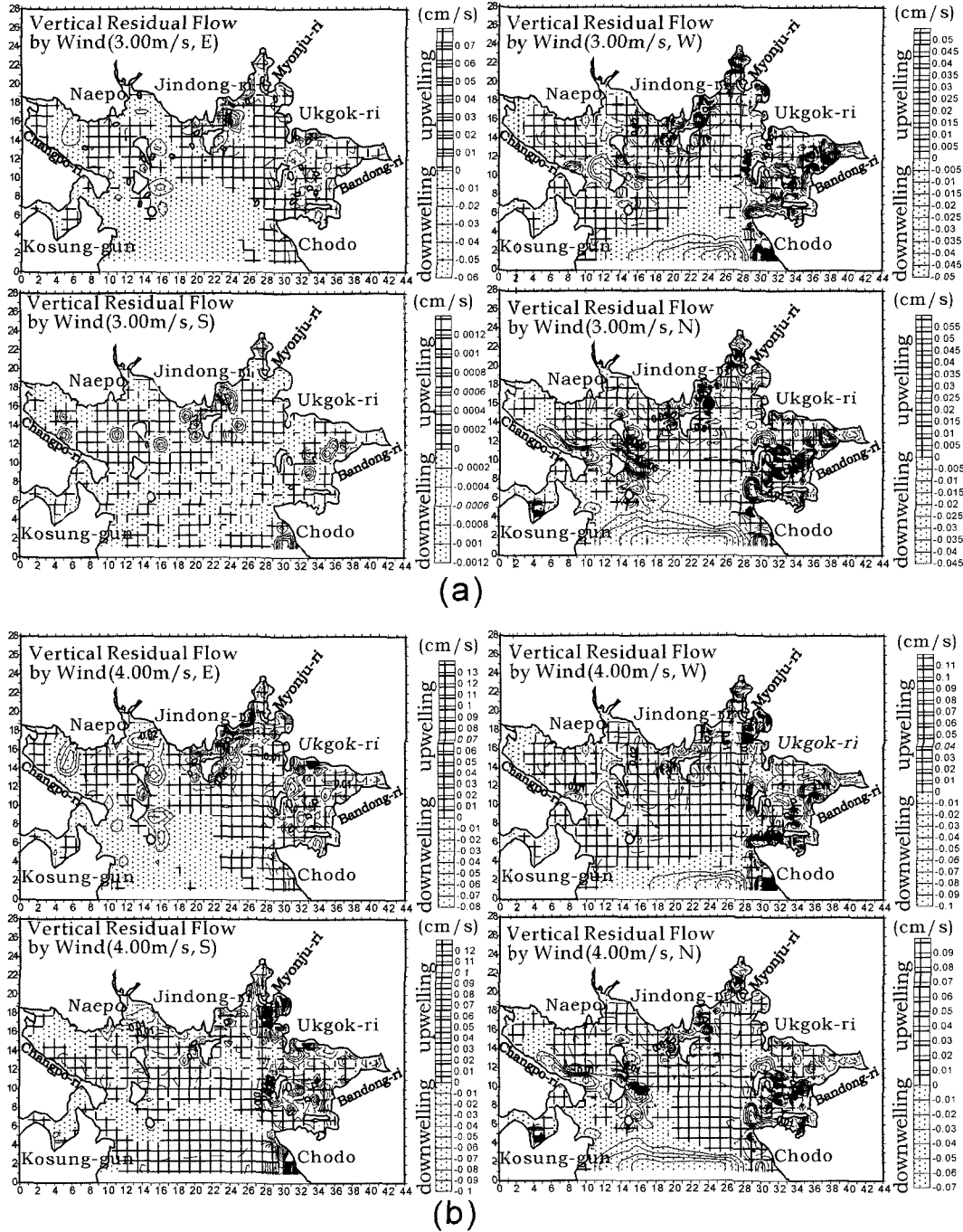


Fig. 7. (a) Averaged vertical residual flow considering the effect of wind (3.00 m/s: E, W, S and N). (b) Averaged vertical residual flow considering the effect of wind (4.00 m/s: E, W, S and N) in Jindong Bay.

설명을 위해서는 성층구조, 수평적 이류 및 연직류의 해석과 함께 천해역인 만 안쪽과 바깥쪽에서의 산소소비속도에 대한 해석이 필요하다.

결론

진동만에서 발생하는 빈산소수괴는 용존산소의 공급과 소비 균형의 결과에 따라 계절적으로 형성과 해소를 반복하고 있으며 다

음과 같이 요약된다.

1. 3 mg/L 이하의 빈산소화는 주로 약층이 강하게 형성되는 하계(7~8월)에 저층에서 존재하며, 만 안쪽(정점 C1)에서는 5월과 6월 저층에서도 확인할 수 있다. 약층이 강하게 형성되는 하계에는 표층에서 고온·저염, 저층에서는 저온·고염이 되어서 연직 기울기는 매우 크게 나타난다.
2. 진동만의 하계 용존산소 5가 형성하는 수심은 약 4~6m이며, 만 안쪽의 형성대는 바깥쪽 보다 상대적으로 표층쪽으로 부상

되어 나타나는 특징적인 현상을 볼 수 있었다.

3. 수심이 깊은 만 바깥쪽(정점 C3, C4)은 조석 잔차류가 탁월한 수역이며, 수심이 깊을수록 다른 수역에 비하여 수평적인 분산계수는 작아서 성층이 강한 하계에는 연직교환이 나빠져 용존산소의 소비속도가 증대되고 저층에서 산소부족현상으로 인한 저산소화가 발생한다.

4. 하계 잔차류는 표·중층에서는 만으로부터 유출하고 저층에서는 유입하는 연직적으로 순환하는 형태로 나타난다. 만 안쪽 유입역에서 유입된 유기물질이 표층의 흐름에 의해서 남하하면서 서서히 침강하고 저층에 침강된 유기물이 저층류에 의하여 만 안쪽으로 유입되어서 만 안쪽의 저층 환경을 축적시키며, 저층의 유기물 분해에 의한 산소의 소비로 인하여 빈산소화가 발생한다.

5. 북풍이나 서풍의 바람에 의해서 만 바깥쪽은 하강류역이 만 안쪽은 상승류역이 발생한다. 하강류역인 만 바깥쪽에서의 저층류에 의해서 유기물질이 만 안쪽으로 유입되어 축적된다. 하계 성층과 유기물질의 분해에 의해서 만 안쪽에 형성된 빈산소화는 이 지역에서 발생하는 상승류에 의해서 표층 근처까지 부상하게 된다.

6. 성층에 따른 수평적인 이류나 연직류와 함께 만 안쪽과 바깥쪽에서의 산소소비속도 계산이 수행되면 빈산소수괴에 대한 보다 정확한 해석이 가능하다.

감사의 글

본 연구는 부경대학교 해양산업개발연구소에서 수행한 과학기술부 “한국연안역에서의 적조발생 예보 및 억제기작 확립에 관한 연구”의 자료를 사용하였음을 밝힙니다.

참고문헌

- 과학기술부, 2000. 한국 연안역에서의 적조발생 예보 및 억제기작 확립에 관한 연구, 396 pp.
- 김동선, 조규대, 박청길, 2001. 적조 다발 지역인 진동만의 해양 환경 특성. 한국환경과학회지, **10**: 159-166.
- 김동선, 2003. 진동만에서 생태계모형을 이용한 환경관리기법. 한국환경과학회지, **12**: 345-358.
- 이필용, 1991. 원문만에서 저산소수괴의 출현과 계절적 변화. 부경대학교 산업대학원 석사학위논문.
- 최우정, 나기환, 전영렬, 박청길, 1991. 부영양화된 북만의 용존산소 수지에 의한 자정능력. 한국수산학회지, **24**: 21-30.
- 최우정, 1993. 진해만의 빈산소수괴 형성에 관한 시뮬레이션. 부경대학교 박사학위논문, 97 pp.
- Hong, K.H., K.T. Kim, S.J. Pae, S.H. Kim and S.H. Lee, 1991. Annual cycles of nutrients and dissolved oxygen in a nutrient rich temperature coastal bay, Jinhae bay, Korea. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **15**: 204-222.
- Iizuka, S and S.H. Min, 1989. Formation of anoxic bottom waters in Omura bay. *Bull. Coastal Oceanor.*, **26**: 75-86. (in Japanese)
- Isobe, A., M. Kamizono and S. Tawara, 1993. An oxygen-deficient water mass in the southwestern part of the Suo Sea. *Bull. Coastal Oceanor.*, **31**: 109-119. (in Japanese)
- Kim, D.S., K.D., Cho and C.I., Lee, 2002. Numerical model reflecting effect of local wind in the inner bay. *Fish. Sci. Suppl. 1*, **68**: 554-557.
- Kuramoto, T. and K. Nakata, 1991. Numerical simulation of the formation and movement of an oxygen deficient water mass in Tokyo bay. *Bull. Coastal Oceanor.*, **28**: 140-151. (in Japanese)
- Matsuyama, M., K. Touma and A. Ohwaki, 1990. Numerical experiments of upwelling in Tokyo bay -In relation to “Aoshio” (the upwelled anoxic blue-green turbid water)-. *Bull. Coastal Oceanor.*, **28**: 63-74. (in Japanese)
- Munk and Anderson, 1948. Note on the theory of the thermocline. *J. Mar. Res.*, **7**: 276-295.
- Nakata, K. and T. Kuramoto, 1992. A model of the formation of oxygen depleted waters in Tokyo bay. *Nakata Pro. Adv. Mar. Tech. Conf.*, **5**: 107-132.
- Sasaki, K., 1989. Mechanism of oxygen deficient water formation. *Bull. Coastal Oceanor.*, **26**: 109-118. (in Japanese)
- Takasugi, Y., T. Higo and H. Yasuda, 1996. The role of bottom current in occurrence of oxygen-deficient water mass. *Umi no Kenkyu*, **5**: 1-11. (in Japanese)
- Takaoka, H., 1989. Physical model of oxygen deficient water formation. *Bull. Coastal Oceanor.*, **26**: 101-108. (in Japanese)
- Yanagi, T., S. Takahashi, A. Hoshika and T. Tanimoto, 1996. Seasonal variation in the transport of suspended matter in the East China Sea. *J. Oceanogr.*, **52**: 539-552.

2002년 10월 5일 원고접수

2003년 5월 13일 수정본채택

담당편집위원: 강창근