

당동만의 빈산소 발생 예측

강훈* · 권민선** · 유선재*** · 김종구****†

*, ** 군산대학교 환경공학과 연구원, *** 군산대학교 환경공학과 교수

The Prediction of Hypoxia Occurrence in Dangdong Bay

Hoon Kang* · Min Sun Kwon** · Sun Jae You*** · Jong Gu Kim****†

*, ** Researcher, Department of Civil & Environmental Engineering, Kunsan National University, Gunsan 54150, Korea

*** Professor, Department of Civil & Environmental Engineering, Kunsan National University Gunsan 54150, Korea

요약 : 본 연구에서는 당동만을 중심으로 빈산소가 발생하는 물리적 해양환경 특성을 파악하고, 로지스틱 회귀분석을 이용해 빈산소 발생확률을 예측하였다. 관측 자료를 분석한 결과, 브런트-바이살라 주파수는 수심이 깊은 만 입구보다 수심이 얇은 만 내측에서 더 크게 나타났다. 이는 당동만 내측에서 담수 유입으로 인해 표층 염분이 낮아져 강한 밀도 성층이 형성되었기 때문이다. 시간적으로는 6월~9월까지 리차드슨 수와 브런트 바이살라 주파수가 매우 높게 나타났고, 9월 2일 이후로는 성층이 완화된 감소하는 경향을 보였다. 당동만에서 관측된 용존산소 및 수온, 염분 자료를 분석한 결과, 저층의 용존산소 농도는 공통적으로 표층과 저층의 수온차에 가장 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 한편, 수심차(dz)를 고정된 변수로 두고, 수온차(dt)의 변화에 의한 빈산소의 발생 확률의 변화를 계산한 결과, 수심차(dz)가 각각 5 m, 10 m, 15 m, 20 m일 경우, 수온차(dt)는 8°C, 7°C, 5°C, 3°C일 때 빈산소 발생확률이 70%를 상회하는 것으로 나타났다. 이는 당동만에서 수심차(dz)가 커질수록 빈산소 발생에 필요한 수온차(dt)는 작아지게 된다는 것을 뜻하며, 특히 당동만에서 수심차(dz)가 20 m 내외인 지역은 빈산소가 발생하기 매우 쉬운 환경이라는 것을 알 수 있었다.

핵심용어 : 빈산소, 로지스틱 회귀모델, 용존산소, 밀도, 수온, 염분

Abstract : The purpose of this study was to investigate the physical characteristics of marine environment, and to predict the probability of the occurrence of hypoxia in the Dangdong bay. We predicted hypoxia using the logistic regression model analysis by observing the water temperature, salinity, and dissolved oxygen concentration. The analysis showed that the Brunt - Väisälä frequency which was shallow than the deep bay entrance, was higher inside the bay due to a lesser amount of fresh water inflow from the inner side of the bay, and density stratification was formed. The Richardson number, and Brunt - Väisälä frequency were very high occasionally from June to September; however, after September 2, the stratification had a tendency to decrease. Analysis of dissolved oxygen, water temperature, and salinity data observed in Dangdong bay showed that the dissolved oxygen concentration in the bottom layer was mostly affected by the temperature difference (dt) between the surface layer and bottom layer. Meanwhile, when the depth difference (dz) was set as a fixed variable, the probability of the occurrence of hypoxia varied with respect to the difference in water temperature. The depth difference (dz) was calculated to be 5 m, 10 m, 15 m, 20 m, and the difference in water temperature (dt) was found to be greater than 70% at 8°C, 7°C, 5°C, and 3°C. This indicated that the larger the difference in depth in the bay, the smaller is the temperature difference required for the generation of hypoxia. In particular, the place in the bay, where the water depth difference was approximately 20 m, was found to generate hypoxia.

Key Words : Hypoxia, Logistic regression model, Dissolved oxygen, Density, Water temperature, Salinity

* First Author : kh1023@hanmail.net, 063-469-1871

† Corresponding Author : kjg466@kunsan.ac.kr, 063-469-1874

1. 서론

빈산소 수괴(Hypoxic water mass)란 수중 용존산소(Dissolved Oxygen)가 극히 부족한 물 덩어리를 말한다(NIFS, 2009). 빈산소 수괴의 용존산소 농도 정의는 연구자마다 조금씩 다르지만 Pearson and Rosenberg(1978)은 용존산소 농도가 3.6 mg/L (2.5 mL/L) 이하로 떨어지게 되면 저서동물이 폐사하기 시작하며, Diaz and Rosenberg(1995), Diaz(2001)는 저서생물 및 생물의 영향을 받기 시작하는 용존산소를 2 mg/L로 정의하고 있다.

빈산소 및 무산소 수괴가 발생한 해역을 'dead zone' 이라 칭하며(Rabalais et al., 2002), 이러한 dead zone은 전 세계 연안 400곳 이상 존재하고, 그 면적은 245,000 km² 달한다(Diaz and Rosenberg, 2008). 또한 많은 아시아 국가의 연안에서 빈산소가 발생하는 것으로 알려지고 있는데(Wu, 1982; Hong, 1987; Jeng and Han, 1996; Lim et al., 2006), 한국의 연안에서는 적조와 연관되어 여름철에 자주 발생하는 것으로 보고되고 있다(Cho, 1991; Kim, 1990).

우리나라에서 빈산소 수괴 또는 무산소 환경이라는 표현을 처음 사용한 것은 Cho(1979)가 1978년 진해만에서 양식굴의 폐사가 대규모 적조로 야기된 저층 빈산소 혹은 무산소 현상이 주원인인 것을 밝히면서였다. 우리나라에서 빈산소가 발생하는 지역은 마산만을 포함한 진해만 일대, 가막만, 시화호, 영산강 하구, 천수만, 남대천 하구, 고성만, 자란만, 한산만, 북신만 등이며, 서해에 위치한 양자강 하구에서도 발생하는 것으로 조사되었다(NIFS, 2009).

빈산소 현상은 지형적 특성, 수온, 염분에 의한 밀도성층이 형성된 오염된 해역에서 퇴적물의 산소요구량(Sediment Oxygen Demand)이 증가할 때 주로 발생한다. 빈산소 현상의 원인을 분류해 보면, 첫 번째 지형적인 원인으로 조류의 소동이 원활하지 않은 폐쇄적인 내만에서 외해수와 해수교환이 충분하지 못해 저층의 용존산소 농도가 빈산소 상태가 된다. 연안역에서 해수순환에 영향을 미치는 것은 조류, 취송류, 밀도류, 해류 등이며, 특히 담수의 유입이 없는 폐쇄성 내만의 경우 조류와 취송류에 의해 해수순환이 결정되는 경우가 대부분이다(Kim et al., 2016).

두 번째 수온과 염분에 의한 밀도성층이 있다. 빈산소 층형성은 환경적 요인들이 복합적으로 작용하여 형성되는데 성층화와 빈산소 층은 밀접한 관계를 가지고 있다(Donald and Nison, 1992; Karim et al., 2002; Simson et al., 1990; Lowery, 1998; Wiseman et al., 1997). 여름철 일사량 증가로 표층 수온이 증가하고, 집중호우로 인해 연안으로 담수가 유입되어 표층에서 고온, 저염수 상태를 유지하고 저층에서는 저온, 고

염수 상태가 되어 밀도성층이 발생한다. Kim and Kim(2003)은 진동만에서 표층수의 고온·저염화에 따라 강한 약층이 형성되어 저층의 용존산소 농도가 3 mg/L 이하로 낮아졌으며, Kim et al.(2012)은 진해만의 빈산소는 수온성층 발생과 더불어 형성하기 시작하여 보통 5~6개월 정도 빈산소 수괴가 유지되고 소멸 또한 성층의 소멸과 같다고 하였다.

세 번째 퇴적물의 산소요구량 증가에 있다. 오염된 해역에서 저층에서는 표층으로부터의 침강 또는 육상으로부터 운반된 유기물 분해에 의한 산소 소모가 활발해 지는 하계에 빈산소 수괴가 주로 발생한다. Kim et al.(2006)은 가막만 빈산소 형성은 저층에서 식물플랑크톤의 대발생 후 유기물 분해에 의한 산소 소비증가와 저층 퇴적물 산소 소모율 증가에 영향을 받는다고 하였고, Lee(2015)는 퇴적물 산소 소모율은 저층수의 온도와 가장 연관이 있는 것으로 보이며, 이는 온도가 높아지면 유기물 분해 대사에 관여하는 박테리아의 활동성이 높아지고 유기물의 분해가 더 활발하게 이루어지면서 산소의 소모가 더 많아지게 되어 빈산소 수괴가 발생한다고 하였다.

이러한 빈산소 현상을 해결할 수 있는 방법은 저층으로 용존산소를 공급하는 것이다. 저층으로 용존산소를 공급할 수 있는 과정은 용존산소가 풍부한 표층으로부터 물리적 과정(이류, 확산 등)을 거쳐 저층에 공급하는 것과 식물플랑크톤의 광합성 작용에 의한 것이 있다. 하지만 빛의 투과율이 약해 저층에서 식물플랑크톤의 광합성 작용에 의한 산소 공급량은 미미하기 때문에 저층에 용존산소를 공급할 수 있는 주요 공급원은 물리적 과정이라 할 수 있다.

해역에서 물리적 과정이 원활하게 이루어져 표층에서 저층으로 용존산소를 공급하느냐가 저층의 용존산소 농도를 결정 하는데 중요하나, 조류가 약한 내만에서는 봄철이나 여름철 수온 상승으로 인해 표층의 수온이 상승하면서 성층이 발달하게 된다. 또한, 수온이 상승하면서 수층 산소요구량(Water Oxygen Demand, WOD)과 퇴적물 산소요구량(Sediment Oxygen Demand, SOD)이 높아지는데 발달된 성층으로 인해 표층의 용존산소가 저층으로 공급되지 못하면서 저층에서부터 빈산소 수괴가 발생하게 된다.

이에, 본 연구에서는 산소가 저층으로 공급되는 물리적 과정에 비중을 두어 여름철 수온 상승과 담수 유입으로 성층이 형성되고, 저층으로의 산소 공급이 차단되어 저층에서 빈산소 현상이 발생하는 일련의 과정을 연구하고자 하였다. 이를 위해서 여름철 강한 성층이 발달하여 빈번하게 빈산소 수괴가 발생하는 당동만을 연구해역으로 선정하고 수온, 염분, 용존산소를 모니터링 하고, 수질 및 퇴적물에 대한 기초 자료를 수집하였다. 이를 이용해 빈산소가 발생하는 당동만

의 수심, 수온, 염분, 밀도 등 물리적 환경특성에 대해 분석하고 로지스틱 회귀모델을 이용하여 당동만의 빈산소 발생 확률을 예측하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 기초자료 수집

당동만의 빈산소 발생을 예측하기 위해 Fig. 1의 정점에서 현장조사를 실시하였다. 관측은 수온, 염분, 용존산소의 지점별 관측 및 연속관측, 조류의 현장 조사를 실시하였다.

당동만 빈산소 수위의 시간적 변화 특성을 파악하기 위하여 Fig. 1에서 2015년 7월 2일부터 9월 24일까지 약 세 달간 계류식 원격관측 장치(Mooring Telemetry System)를 이용해 두 지점(MTS-1, MTS-2)의 표층과 저층에서 수온, 염분, 용존산소 농도의 시간 변화를 10분 간격으로 연속 관측을 하였다.

또한 공간적 변화 특성을 파악하기 위하여 10개 지점(DD-1~DD-10)에서 CTD(Conductivity, Temperature, Depth)를 이용하여 2015년 6월 16일부터 11월 24일까지 총 19회 관측하였으며, 당동만의 연직혼합 정도 파악하기 위해 조류를 관측하였다. 조류관측은 RDCP(Recording Doppler Current Profiler)를 이용하여 C-1 지점에서 2015년 3월 12일부터 3월 31일까지 15일 이상 관측을 하였다.

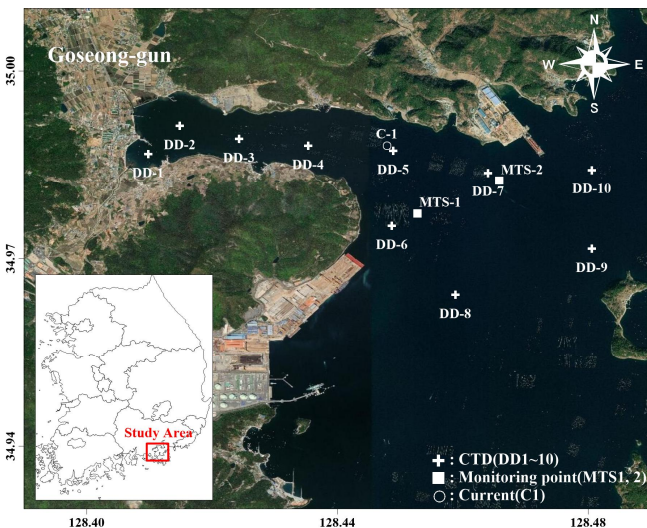


Fig. 1. The observation points for CTD, current and monitored points.

2.2 성층발생의 물리환경적 특성 분석

성층은 밀도가 작은 유체가 밀도가 큰 유체의 위쪽에 위치하여 수직적으로 층을 이루는 현상을 말한다. 중력장에서 성층을 이루고 있는 유체를 연직방향으로 이동시켰을 때

부력에 의한 복원력이 작용하여 수직적으로 주기운동을 하게 되는데, 이때의 진동수 N 을 Brunt - Väisälä frequency(BVf, Brunt, 1927; Väisälä, 1925) 라고 하며, 이를 성층 강도의 척도로 활용할 수 있다. 아래 식에서 알 수 있듯이 이 진동수는 성층이 강할수록 커지게 된다.

$$N = \sqrt{-\frac{g}{\rho} \frac{d\rho}{dz}} \quad (1)$$

여기서, g 는 중력가속도, dz 는 표층과 저층의 수심차, $d\rho$ 는 밀도차, ρ 는 포텐셜 밀도이며, 수온과 염분의 함수이다.

한편, 해양에서는 연직 혼합의 정도를 판단하기 위해 위진동수에서 전단력을 포함한 Richardson Number(Ri No., Richardson, 1920)를 사용해왔다. Richardson Number는 전단력의 크기인 S (Shear magnitude)와 Brunt - Väisälä frequency의 비로, 성층 해양에서는 중요한 의미를 가지며, 아래와 같이 나타낸다.

$$R_i = \frac{N^2}{S^2} = \frac{N^2}{(\partial u / \partial z)^2 + (\partial v / \partial z)^2} \quad (2)$$

여기서, $\partial u / \partial z$ 와 $\partial v / \partial z$ 은 각각 유속 u, v 의 연직 변화를 나타낸다. 일반적으로 Richardson Number가 0.25보다 작으면 난류 혼합이 발생한다는 것을 의미하며, 1보다 클 때, 일반적으로 난류 혼합이 억제된다.

2.3 빈산소 발생 규명을 위한 상관분석

빈산소 발생원인을 파악하기 위해 Fig. 1의 10개 지점에서 총 19회 관측된 지점별 관측자료와 2개 지점에서 약 90일간 연속 관측된 자료를 이용하였다.

지점별 관측자료의 상관분석은 10개 지점에서 관측한 표층과 저층의 수온차(dt), 염분차(δs), 수심차(dz)와 이를 이용해 계산된 밀도차($d\rho$), Brunt - Väisälä frequency(BVf), Richardson Number(Ri No.)를 저층 용존산소 농도와 상관관계를 분석하였다. 표층과 저층의 차이는 표층 관측지점과 저층 관측지점에서의 관측값 차이를 뜻하며, 이중 수심차는 표층 관측지점과 저층 관측지점의 수심차이를 뜻한다.

연속 관측자료를 이용한 상관분석은 2개 지점에서 관측한 수온, 염분, 용존산소, Richardson Number와 통영 기상대의 풍속과 풍향 등의 자료를 이용하여 저층 용존산소 농도와 상관관계를 분석하였다. 풍속과 풍향은 통영 기상대에서 관측된 1시간 간격의 자료를 10분 간격으로 보간하여 사용하였고, 풍향의 경우 서풍과 동풍의 두 가지 범주만을 가지는 질적 변수로 변환하여 분석하였다.

2.4 지점별 관측자료를 이용한 빈산소 발생 확률예측 방법

빈산소 발생확률의 예측에는 로지스틱 회귀모델을 이용하였으며, 다양한 수심 조건을 고려하기 위해 10개의 지점에서 관측된 수온, 염분, 용존산소 농도, 수심 등을 이용하였다. 독립변수는 표층과 저층의 수온차(dt), 염분차(δs), 밀도차($d\rho$), Brunt - Väisälä frequency(BVf), Richardson Number(Ri No.), 수심차(dz)의 6가지로 선정하였다. 빈산소 수괴의 출현 조건은 3 mg/L를 기준으로 하였고, 저층의 용존산소 농도가 3 mg/L 미만인 경우는 빈산소(hypoxia) 상태, 3 mg/L 이상인 경우는 보통(normal) 상태로 구분하여, 빈산소 수괴가 출현할 확률을 구하였다.

로지스틱 회귀는 선형회귀를 질적변수의 예측에 맞게 변형한 것으로, 모든 독립변수 X 값에 대해 0과 1 사이의 값을 제공하는 함수를 사용하는 로지스틱 함수를 이용한다. 예측에 사용된 로지스틱 함수 $p(X)$ 는 아래와 같이 표현된다 (James et al., 2013).

$$p(X) = \frac{e^{\beta_0 + \beta_1 X}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1 X}} \quad (3)$$

여기서, $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n$ 은 로지스틱 함수의 계수 추정치를 뜻한다. 위의 식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{p(X)}{1-p(X)} = e^{\beta_0 + \beta_1 X} \quad (4)$$

위 식에서 양변에 로그를 취하면 다음을 얻는다.

$$\log\left(\frac{p(X)}{1-p(X)}\right) = \beta_0 + \beta_1 X \quad (5)$$

위 식에서 좌변은 로그 공산(log-odds) 또는 로짓(logit)이라고 한다. 로지스틱 회귀모델(식 5)은 X 에 선형적인 로짓을 갖는다. 한편, 독립변수들이 다수이기 때문에 단순선형회귀에서 다중선형회귀로의 확장은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\log\left(\frac{p(X)}{1-p(X)}\right) = \beta_0 + \beta_1 X + \dots + \beta_p X_p \quad (6)$$

여기서, $X = (X_1, \dots, X_p)$ 는 p 개의 독립변수이다. 따라서, 위 식은 아래와 같이 다시 쓸 수 있다.

$$p(X) = \frac{e^{\beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_p X_p}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_p X_p}} \quad (7)$$

식(6), (7)과 같이 로지스틱 회귀는 다중로지스틱 회귀(Multiple Logistic regression)로 확장이 가능하다. 빈산소 발생을 예측하는 데에는 표층과 저층의 수온차(dt), 염분차(δs), 밀도차($d\rho$), Brunt - Väisälä frequency(BVf), Richardson Number(Ri No.), 수심차(dz) 등 여러 개의 독립변수들을 이용하기 때문에 다중로지스틱 회귀모델을 사용하게 된다.

위 식(3)의 계수 β_0, β_1 은 관측 데이터를 이용하여 추정한다. 식(5)는 2가지 범주를 가지는 로지스틱 회귀모델이며, 독립변수를 종속변수에 적합(Fitness)하는 데에는 최대가능도(Maximum Likelihood)를 사용한다. 식(3)을 사용하여 예측한 빈산소가 발생할 확률 $\hat{p}(x_i)$ 이 관측된 빈산소의 발생 빈도와 가능하면 가깝게 일치하도록 β_0, β_1 을 추정하는 것이다. 즉, 추정치 $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1$ 을 찾고자 하는데, 이 추정치를 주어진 식(3)의 $p(X)$ 에 대입하면 빈산소가 발생했던 환경에 대해서는 1에 가깝고, 발생하지 않았던 환경에 대해서는 0에 가까운 값을 제공한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 성층발생 요인의 물리환경적 특성

빈산소 발생에 가장 중요한 성층의 특성을 분석하기 위해 당동만의 10개 지점에서 총 19회 관측된 자료를 이용하여 관측 시기별로 Richardson Number를 구하여 비교하였다.

Fig. 1의 10개 지점(DD-1~DD-10)에서 관측한 수온, 염분 결과로부터 포텐셜 밀도를 구하고, 표층과 저층의 밀도차를 이용하여 성층 안정도를 나타내는 Brunt - Väisälä Frequency를 구하였다. 또한 C-1에서 관측한 평균 유속을 이용하여 Richardson Number를 구하였으며, 이 때 유속은 관측치 평균 유속인 표층 3.95 cm/s, 저층 2.74 cm/s, 수심은 CTD로부터 관측된 수심을 이용하였다.

이를 바탕으로 DD-1~DD-10까지 10개 지점에 대하여 시간에 따른 Brunt - Väisälä Frequency와 Richardson Number의 변화를 Fig. 2에 도시하였다.

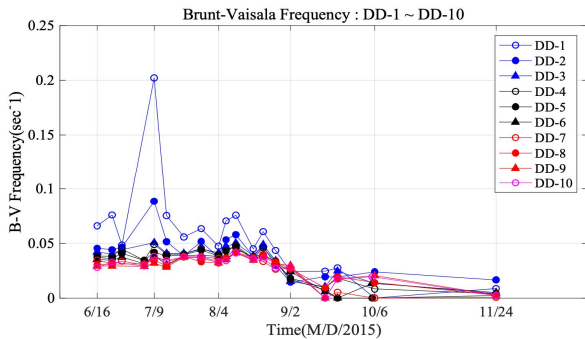
성층이 강하게 나타나는 7월 9일과 성층이 약하게 나타나는 11월 24일에 Brunt - Väisälä Frequency 및 Richardson Number의 공간 분포를 보면, Brunt - Väisälä Frequency의 경우, 수심이 깊은 만 입구보다 수심이 얇은 만 내측에서 더 높은 수치를 보였다.

이는 담수 유입의 영향으로 표층 염분이 낮게 나타났기

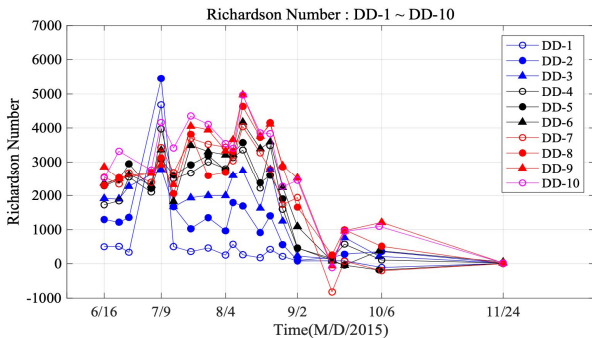
당동만의 빈산소 발생 예측

때문이며, 당동만의 내측은 염분의 차이로 인한 강한 밀도 성층이 형성되었음을 알 수 있다. 만 내측에서 Richardson Number 또한 높게 나타난 것은 공간적으로 모두 동일한 유속 차를 적용했기 때문이며, 실제로는 수심이 매우 낮은 만 안쪽(DD-1의 경우 5미터 미만)에서는 Shear Magnitude가 커서 Richardson Number가 상대적으로 작아지게 된다.

당동만의 각 지점에서는 시간의 변화에 따라 Richardson Number가 변화하고 있지만 대체로 매우 큰 값을 나타내며, 이를 바탕으로 수층이 매우 안정되어 있다는 것을 알 수 있다. 유속 차를 동일하게 적용했을 때, Brunt - Väisälä Frequency와 Richardson Number는 6월~9월까지 매우 높게 나타나다가 9월 2일 이후 감소하는 경향을 보였는데, 이는 9월 이후에 강한 바람과 해수면의 온도 하강으로 성층이 완화되었기 때문이다.



(a) Brunt - Väisälä frequency



(b) Richardson Number

Fig. 2. The variation of Brunt - Väisälä frequency and Richardson number in Dangdong Bay with the lapse of time.

3.2 빈산소 발생 규명을 위한 상관분석

지점별 관측자료와 연속관측된 자료의 상관분석 결과는 다음과 같다.

1) 지점별 관측자료를 이용한 상관분석 결과

Fig. 1 당동만의 10개 지점(DD-1 ~ DD-10)에서 관측한 자료

를 이용하여 빈산소가 발생하는 환경적 특성을 파악하였다. 총 19회 관측한 자료의 결과는 Table 1에 제시하였으며, 10개의 지점에 대해 빈산소 출현 빈도를 기준으로 두 개의 그룹으로 구분하였다.

빈산소 현상의 출현율이 30% 미만이고 표층과 저층의 평균 수심차가 10m 미만인 DD-1과 DD-2를 Group A, 빈산소 출현율이 60% 이상이고 수심차가 10m 이상인 나머지 DD-3 ~ DD-10까지를 Group B로 그룹화 하였다(Fig. 3). Group A의 경우는 만의 내측으로 수심이 낮고 담수의 유입이 많으며, Group B의 경우는 수심이 약 10미터 이상인 만의 중심부와 입구 부근이다.

Table 1의 관측결과를 이용하여 두 그룹(A, B)의 저층 용존산소 농도(DO_bot), 저층 수온(temp_bot), 표층과 저층의 수심차(d_z), 수온차(dt), 염분차(δs), 밀도차($d\rho$), Richardson Number(Ri No.)에 대하여 상관관계를 분석하여 Table 2와 3에 나타내었다.

Group A에서 밀도차($d\rho$)와 염분차(δs)의 상관계수는 0.97로 매트릭스 중 가장 높은 상관관계를 보였고, 연직혼합의 정도를 나타내는 Richardson Number도 수온차(dt)보다 염분차(δs)와의 상관계수가 높게 나타났다(Table 2).

Group A는 담수유입으로 인한 표층과 저층의 염분 차이가 성층을 형성한다는 것을 의미하며, 저층의 용존산소 농도는 표층과 저층의 수온차(dt)와 수심차(d_z)에 영향을 받는 것으로 나타났다. 이는 곧 수심이 낮고 수온차가 작을수록 저층의 용존산소 농도가 높게 나타난다는 것을 의미한다.

한편, Group B에서 밀도차와 염분차의 상관계수는 0.74로 밀도차($d\rho$)와 수온차(dt)의 상관계수 -0.89 보다 낮게 나타났으며, 연직혼합의 정도를 나타내는 Richardson Number도 염분차(δs)보다 수온차(dt)와의 상관계수가 높게 나타났다(Table 3). Group B는 Group A와 달리 표층과 저층의 염분 차이보다 수온 차이가 성층 강도에 더 큰 영향을 준다는 것을 의미하며, 저층의 용존산소 농도는 표층과 저층의 밀도차($d\rho$)와 Richardson Number의 영향을 크게 받는 것을 나타냈고, Group A와 다르게 수심차(d_z)에는 거의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 이는 Group B에서는 수심이 충분히 깊기 때문에 성층이 강해질수록 저층 용존산소 농도가 더 낮게 나타난다는 것을 의미한다.

즉, Group A에서는 성층의 형성에 염분차(δs)가 영향을 미치며, Group B에서는 수온차가 더 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 이로써, Group B에서 빈산소 현상의 출현은 표층과 저층의 수온차이로 인한 밀도차($d\rho$)와 연직혼합의 척도인 Richardson Number에 의해서 결정된다고 가정할 수 있다.

Table 1. The observation results of Temperature, Salinity, Dissolved Oxygen in Dangdong Bay

Items	Temperature (°C)		Salinity (psu)		DO (mg/L)	
	Surface (range)	Bottom (range)	Surface (range)	Bottom (range)	Surface (range)	Bottom (range)
6/16	20.0~22.9	15.2~17.5	33.0~33.6	33.4~34.5	8.3~9.8	0.5~5.5
6/22	21.2~23.6	15.5~19.2	32.5~33.8	33.7~34.4	8.1~9.0	1.0~6.7
6/26	22.4~24.0	16.5~18.8	33.0~34.1	33.7~34.4	7.9~8.5	0.5~3.4
7/5	22.3~24.0	17.0~18.5	33.4~33.6	34.0~34.2	7.8~8.4	0.5~2.3
7/9	22.1~24.7	17.3~23.2	10.4~33.0	33.4~34.1	7.8~11.0	0.5~6.5
7/14	22.8~24.3	18.3~22.1	30.6~33.0	33.1~33.9	7.4~8.6	1.0~5.0
7/21	23.7~25.7	18.7~24.4	30.8~31.7	32.0~33.7	7.5~8.2	0.3~4.8
7/28	24.1~27.9	18.5~23.0	32.3~32.9	32.9~34.0	7.4~8.9	0.3~4.3
8/4	24.4~26.5	18.8~22.6	32.8~33.0	33.0~33.7	6.5~7.3	0.7~6.1
8/7	26.0~28.8	18.9~22.7	32.7~33.0	33.0~33.6	6.8~7.6	0.4~6.6
8/11	27.7~29.0	18.3~24.8	32.7~32.9	32.9~34.0	7.0~7.6	0.5~7.1
8/18	25.9~28.0	18.7~26.4	32.8~33.2	33.1~34.1	6.8~7.7	0.3~6.3
8/22	25.3~26.9	19.0~26.1	30.9~32.9	33.3~34.1	7.0~8.5	0.3~6.2
8/27	25.4~27.0	20.8~25.8	32.4~32.8	33.1~33.9	7.0~9.1	0.3~7.4
9/2	25.4~26.5	22.1~26.0	32.4~32.7	32.7~33.6	7.4~8.7	0.5~6.8
9/16	23.9~24.5	23.8~24.1	31.6~33.7	31.9~32.6	5.9~8.5	4.6~7.5
9/21	24.4~25.7	23.1~24.7	31.7~33.0	32.1~32.6	8.1~9.7	2.5~6.9
10/6	22.9~23.6	21.8~23.0	31.5~33.3	31.9~33.1	5.8~11.0	4.3~8.5
11/24	16.7~17.1	16.9~17.1	33.0~33.3	33.1~33.3	6.7~8.0	6.3~8.0

Table 2. Correlation matrix of bottom DO concentration and other parameters of Group A

Items	DO_bot	temp_bot	dz	dt	δs	dρ	Ri No.
DO_bot	1.00						
temp_bot	0.43	1.00					
dz	-0.61	-0.15	1.00				
dt	-0.72	-0.49	0.28	1.00			
δs	-0.07	-0.06	0.03	0.11	1.00		
dρ	0.11	0.04	-0.03	-0.13	0.97	1.00	
Ri No.	-0.32	-0.14	0.35	0.26	-0.81	-0.87	1.00

Table 3. Correlation matrix of bottom DO concentration and other parameters of Group B

Items	DO_bot	temp_bot	dz	dt	δs	dρ	Ri No.
DO_bot	1.00						
temp_bot	0.41	1.00					
dz	-0.06	-0.17	1.00				
dt	-0.77	-0.53	-0.03	1.00			
δs	0.55	0.20	0.06	-0.36	1.00		
dρ	0.81	0.44	0.06	-0.89	0.74	1.00	
Ri No.	-0.80	-0.47	0.21	0.86	-0.70	-0.95	1.00

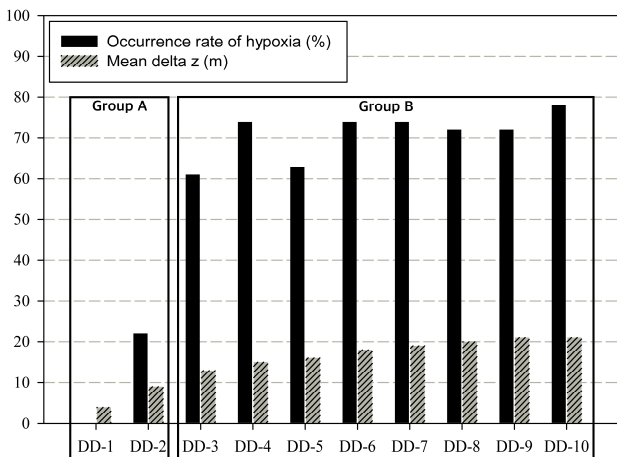


Fig. 3. Occurrence rates of hypoxia and mean delta-z in each stations.

2) 연속 관측자료를 이용한 상관분석 결과

Fig 1의 2개 지점(MTS-1, MTS-2)에서 약 90일간 관측한 자료를 이용하여 빈산소가 발생하는 환경적 특성을 파악하였다.

관측 자료의 이상치를 제거한 후 저층 용존산소 농도(DO_bot), 저층 수온(temp_bot), 표층과 저층의 수심차(dz), 수온차(dt), 염분차(δs), 밀도차(dρ), Richardson Number(Ri No.), 풍속(wind_spd)에 대한 상관관계를 분석하였다.

Table 4와 Table 5은 연속 관측지점(MTS-1, MTS-2)에서 저층의 용존산소 농도와 나머지 변수들 간의 상관관계를 나타낸 것이다. 저층 용존산소 농도와 표·저층 수온차의 상관계수는 각각 -0.45, -0.43으로 가장 높게 나타났으며, 표·저층 염분차의 상관계수는 각각 0.07, 0.29로 나타났다.

연속 관측지점에서 저층의 용존산소 농도는 표·저층 염분차 보다는 표·저층 수온차에 가장 큰 영향을 받는 것으로 나타났다으며, MTS-1에서는 염분차로 인한 영향은 거의 없는 것으로 나타났다.

당동만의 빈산소 발생 예측

Table 4. Correlation matrix of bottom DO concentration and parameters at MTS-1

Items	DO_bot	temp_bot	dz	dt	δs	dρ	Ri No.	wind_spd
DO_bot	1.00							
temp_bot	0.05	1.00						
dz	-0.02	-0.09	1.00					
dt	-0.45	-0.82	0.09	1.00				
δs	0.07	-0.08	0.01	0.06	1.00			
dρ	0.40	0.54	-0.05	-0.70	0.67	1.00		
Ri No.	-0.39	-0.54	0.14	0.70	-0.67	-1.00	1.00	
wind_spd	0.21	0.04	0.06	-0.15	-0.17	0.00	0.01	1.00

Table 5. Correlation matrix of bottom DO concentration and parameters at MTS-2

Items	DO_bot	temp_bot	dz	dt	δs	dρ	Ri No.	wind_spd
DO_bot	1.00							
temp_bot	0.20	1.00						
dz	0.00	-0.04	1.00					
dt	-0.43	-0.69	0.06	1.00				
δs	0.29	0.28	-0.03	-0.58	1.00			
dρ	0.40	0.50	-0.05	-0.86	0.92	1.00		
Ri No.	-0.39	-0.50	0.12	0.85	-0.91	-1.00	1.00	
wind_spd	0.14	0.11	0.11	-0.19	0.02	0.10	-0.09	1.00

Table 6와 Table 7는 연속 관측지점(MTS-1, MTS-2)에 대하여 저층 용존산소농도에 대한 선형회귀 계수 추정치와 p-value를 나타낸 것이다.

MTS-1에서는 저층 용존산소 농도에 대해 모든 변수들의 p-value가 0.001 미만으로 유의하지만, MTS-2에서는 표·저층 수심차와 Richardson Number의 p-value가 0.1 보다 높아 유의하지 않게 나타났다.

수심차나 Richardson Number가 유의하지 않게 나타난 이유는 고정된 2개의 지점에서 연속적으로 관측되어 수심의 변화가 제한적인 데이터를 분석했기 때문이며, 향후 제시할 지점별 수온, 염분, 용존산소 관측자료 분석에서는 전혀 다른 결과를 보인다.

표·저층 염분차나 풍속은 상관관계 분석에서는 다소 약한 상관성을 보였으나, p-value를 보면 저층의 용존산소 농도와 유의한 관계에 있다고 볼 수 있다.

Table 6. The p-values of linear regression for MTS-1

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	39.23	1.724	22.751	< 2e-16 ***
temp_bot	-1.189	0.03706	-32.084	< 2e-16 ***
dz	-0.6264	0.1253	-4.998	5.98e-07 ***
dt	-6.958	0.4816	-14.448	< 2e-16 ***
δs	14.54	1.152	12.618	< 2e-16 ***
dρ	-16.3	1.674	-9.734	< 2e-16 ***
Ri No.	0.00358	0.0007733	4.63	3.74e-06 ***
wind_spd	0.06601	0.008854	7.455	1.04e-13 ***

※ Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Table 7. The p-values of linear regression for MTS-2

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	14.64	1.472	9.946	< 2e-16 ***
temp_bot	-0.4886	0.03904	-12.515	< 2e-16 ***
dz	0.002342	0.08971	0.026	0.97917
dt	-4.666	0.4605	-10.133	< 2e-16 ***
δs	10.46	1.108	9.444	< 2e-16 ***
dρ	-13.64	1.478	-9.227	< 2e-16 ***
Ri No.	0.0003224	0.0004552	0.708	0.47875
wind_spd	0.02676	0.008225	3.253	0.00115 **

※ Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Table 8과 Table 9은 두 개의 연속관측 지점에서 빈산소의 발생여부에 대한 로지스틱 회귀모델 계수 추정치와 p-value를 나타낸 것으로, 앞서 살펴본 선형회귀와는 다른 의미를 가진다. 로지스틱 회귀분석에서 p-value 값이 낮다는 것은 저층 용존산소의 농도와 관계가 아니라 빈산소 발생 여부와 유의한 관계에 있다는 것을 의미한다. 이 결과에서도 앞서 선형회귀와 마찬가지로 거의 모든 독립변수들(저층수온, 수심차, 수온차, 염분차, 밀도차, Richardson Number, 풍속, 풍향)이 빈산소 발생에 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났다.

Table 8. The p-values of logistic regression model for MTS-1

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)
(Intercept)	61.59	4.072	15.123	< 2e-16 ***
temp_bot	-2.155	0.09132	-23.596	< 2e-16 ***
dz	-0.7732	0.2831	-2.731	0.00631 **
dt	-16.83	1.183	-14.228	< 2e-16 ***
δs	37.3	2.836	13.152	< 2e-16 ***
dρ	-43.77	4.003	-10.934	< 2e-16 ***
Ri No.	0.006821	0.001868	3.652	0.00026 ***
wind_spd	0.119	0.02286	5.205	1.94e-07 ***
wind_dir(east)	0.5049	0.1163	4.343	1.41e-05 ***

※ Signif. codes : 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Table 9. The p-values of logistic regression for MTS-2

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)
(Intercept)	13.42	3.539	3.793	0.000149 ***
temp_bot	-0.952	0.09684	-9.83	< 2e-16 ***
dz	0.7541	0.2178	3.463	0.000535 ***
dt	-13.96	1.234	-11.307	< 2e-16 ***
δs	33.38	2.994	11.149	< 2e-16 ***
dρ	-46.54	4.059	-11.467	< 2e-16 ***
Ri No.	-0.003219	0.001295	-2.487	0.012898 *
wind_spd	0.1085	0.01828	5.932	2.99e-09 ***
wind_dir(east)	0.4922	0.1085	4.535	5.77e-06 ***

※ Signif. codes : 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

3) 지점별 관측자료 및 로지스틱 회귀모델을 이용한 빈산소 수괴 발생 확률 예측

빈산소 발생 확률의 예측에 다양한 수심 조건을 고려하기 위해 Fig. 1의 10개 지점(DD-1 ~ DD-10)에서 2015년 6월 16일부터 11월 24일까지 총 19회 관측한 자료를 이용하였다.

빈산소 발생 확률을 예측하기 위해 로지스틱 회귀모델을 사용하였으며, 표층과 저층의 수온차(dt), 염분차(δs), 밀도차(dρ), 수심차(dz), Richardson Number(Ri No.), Brunt - Väisälä Frequency(BVf)의 독립변수를 사용하였다. 각 독립변수들에 대한 로지스틱 회귀모델의 계수 추정치를 Table 10에 제시하였다. p-value는 표·저층의 수심차(dz)가 가장 낮게 나타났고, 그 다음이 수온차로 나타나 이 두 가지 변수가 6개의 독립변수 중 가장 유의한 것으로 나타났다.

빈산소 발생 확률을 예측하기 위하여 수심차(dz)와 수온차(dt)를 독립변수로 한 로지스틱 회귀 모델을 수행하였다 (Table 11).

Table 12는 이 로지스틱 회귀 모델의 설명력을 표현하기 위해서 선형회귀의 결정계수와 유사한 의미를 갖는 Mcfadden R²(Mcfadden, 1974) 값을 구하여 제시한 것이며, Mcfadden R²는 아래와 같이 계산된다.

$$R_{McF}^2 = 1 - \ln(L_M) / \ln(L_0) \quad (8)$$

로지스틱 회귀분석이 가능도 함수(likelihood function)를 최대화하기 위한 계수를 추정하는 것인데, L₀는 계수 추정치가 모두 0인 모형, 즉 절편만 존재하는 가능도 함수이고, L_M은 예측된 모형에 대한 가능도 함수이다. 위 식의 원리는 ln(L₀)이 선형 회귀분석에서 잔차제곱합(residual sum of squares)과 동일한 역할을 하므로, Mcfadden R²는 잔차 분산(residual variance)의 감소비율에 해당한다는 것으로, 이를 유사(pseudo) R²라 부르기도 한다.

6개의 독립변수를 모두 고려한 로지스틱 회귀모델의 Mcfadden R²는 0.7422로 예측력이 매우 뛰어나다고 볼 수 있으며, 수심차(dz)와 수온차(dt)만을 고려했을 경우, 로지스틱 회귀모델의 Mcfadden R²는 0.7160으로 6개 변수를 함께 고려했을 때보다 약 0.026 낮은 수치를 보였다. 하지만 두 값의 차이가 매우 작아 수심차(dz)에 따른 빈산소 수괴 출현 확률은 거의 수온차(dt)에 의해 결정된다고 보여진다. 이러한 결과를 바탕으로 수심차(dz)에 따른 수온차(dt)의 빈산소 수괴 발생 확률을 예측하여 Table 13에 제시하였다.

Table 10. The p-value of logistic regression model

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)
(Intercept)	8.937e+00	2.974e+00	3.005	0.00265 **
dt	-2.035e+00	1.114e+00	-1.828	0.06761'
δs	3.817e+00	2.824e+00	1.352	0.17653
dρ	-6.075e+00	3.856e+00	-1.575	0.11515
BVf	-7.923e+01	5.206e+01	-1.522	0.12798
Ri No.	-9.881e-04	6.243e-04	-1.583	0.11349
dz	-2.992e-01	1.364e-01	-2.193	0.02830 *

※ Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Table 11. Logistic regression results for delta z and delta temperature

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)
(Intercept)	7.37348	1.24601	5.918	3.27e-09 ***
dt	-0.90055	0.12881	-6.991	2.73e-12 ***
dz	-0.27719	0.05976	-4.639	3.51e-06 ***

※ Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

당동만의 빈산소 발생 예측

Table 12. Mcfadden's R² of each logistic models

	6 explanatory variables	dz and dt
Macfadden's R ²	0.7422	0.7160

Table 13. The hypoxia predictions using delta temperature

delta depth(dz)	delta temperature (dt)	p (probability of hypoxia by dt)
5	0	0.003
	1	0.006
	2	0.015
	3	0.036
	4	0.084
	5	0.185
	6	0.358
	7	0.578
	8	0.772
10	0	0.010
	1	0.024
	2	0.057
	3	0.130
	4	0.269
	5	0.475
	6	0.690
	7	0.846
	8	0.931
15	0	0.039
	1	0.090
	2	0.196
	3	0.374
	4	0.595
	5	0.784
	6	0.899
	7	0.956
	8	0.982
20	0	0.138
	1	0.283
	2	0.493
	3	0.705
	4	0.855
	5	0.935
	6	0.973
	7	0.989
	8	0.995

수심차(dz)와 수온차(dt)의 두 변수를 이용하여 당동만의 빈산소 발생 확률을 예측한 결과, 수심차(dz)가 각각 5 m, 10 m, 15 m, 20 m일 경우, 수온차(dt)는 8℃, 7℃, 5℃, 3℃일 때 빈산소 발생확률이 70%를 상회하는 것으로 나타났다.

이는 당동만에서 수심차(dz)가 커질수록 빈산소 발생에 필요한 수온차(dt)는 작아지게 된다는 것을 뜻하며, 당동만에서 수심차가 20 m 내외인 지역은 빈산소가 발생하기 매우

쉬운 환경이라는 것을 의미한다.

이와 같이 관측 자료를 이용해 분석한 결과 당동만에서 표층과 저층의 수온차가 성층 형성에 가장 큰 영향을 주고, 수심이 깊은 곳에서 빈산소 발생 확률이 높아지는 것을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 해양에서 적조와 더불어 오랜 기간 난제로 다루어지는 빈산소의 예측이라는 연구에 대해 다루고자 하였다. 먼저 빈산소가 상습적으로 발생하는 해역 중 하나인 당동만 일대를 연구 대상 해역으로 하여 관측 자료를 바탕으로 빈산소가 발생하기 쉬운 물리적 환경 특성을 파악하였다.

1. 약 3개월간 2개 지점에서 자동 관측된 수온, 염분, 용존 산소 농도의 연속관측 자료를 이용하여 저층 용존산소와 다른 요인들 간의 상관관계 및 통계적 유의성을 살펴보았다. 그 결과 저층의 용존산소 농도는 수온, 수온차, 염분차, 밀도차, Richardson Number, 풍속 등 거의 모든 독립변수에 대해 유의한 p-value를 보였으며, 저층 용존산소와의 상관계수는 표·저층 수온차가 가장 크게 나타났다.

2. 당동만 내 10개 지점에서 CTD를 이용해 관측된 자료로부터 로지스틱 회귀모델을 통해 환경적 특성에 따른 빈산소 수괴의 발생 확률을 예측하였다. 그 결과 당동만 내 수심차가 5 m인 지점에서는 표층과 저층의 수온차가 8℃일 때 빈산소의 발생 확률이 77% 이상이며, 수심차가 20 m인 경우에는 수온차가 3℃만 되어도 빈산소 발생 확률이 70%를 상회하는 것으로 나타났다.

사 사

이 논문은 2019년 군산대학교 수산과학연구소 학술연구비 지원으로 수행된 연구이며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- [1] Brunt, D.(1927), The period of simple vertical oscillations in the atmosphere, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Vol. 53, Issue 221, pp. 30-32.
- [2] Cho, C. H.(1979), Mass Mortalities of Oyster due to Red Tide in Jinhae Bay in 1978, Journal of the Korean Fisheries Society, Vol. 12, No. 1, pp. 27-33.
- [3] Cho, C. H.(1991), Mariculture and eutrophication in Jinhae Bay, Korea. Marine Pollution Bulletin, 23, pp. 275-279.
- [4] Diaz, R. J.(2001), Overview of hypoxia around the world,

- Journal of Environmental Quality, 30(2), pp. 275-281.
- [5] Diaz, R. J. and R. Rosenberg(1995), Marine Benthic Hypoxia: A Review of Its Ecological Effects and the Behavioural Responses of Benthic Macrofauna, *Oceanography and Marine Biology, An Annual Review*, 33, pp. 245-303.
- [6] Diaz, R. J. and R. Rosenberg(2008), Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems, *Science*, 321(5891), pp. 926-929.
- [7] Donald, W. S. and S. W. Nixon(1992), Stratification and Bottom-Water Hypoxia in the Pamlico River Estuary, *Estuaries and Coast*, 15(3), pp. 270-281.
- [8] Hong, J. S.(1987), Summer oxygen deficiency and benthic biomass in the Chinhae Bay system, Korea. *J. of the Korean Society of Oceanography*, 22(4), pp. 246-256.
- [9] James, G., D. Witten, T. Hastie, and R. Tibshirani(2013), *An Introduction to Statistical Learning (with Applications in R)*, Springer, ISBN 978-1-4614-7137-0, pp. 130-133.
- [10] Jeng, W. L. and B. C. Han(1996), Coprostanol in a sediment core from the anoxic Tan-Shui Estuary, Taiwan. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 42(6), pp. 727-735.
- [11] Karim, M. R., M. Sekine, and M. Ukita(2002), Simulation of eutrophication and associated occurrence of hypoxic and anoxic condition in a coastal bay in Japan, *Marine Pollution Bulletin*, 45(1-12), pp. 280-285.
- [12] Kim, D. S. and S. W. Kim(2003), Mechanism of Oxygen-Deficient Water Formation in Jindong Bay, *Journal of the Korean Society of Oceanography*, Vol. 8, No. 2, pp. 177-186.
- [13] Kim, H. G.(1990), Characteristics of flagellate red tide and environmental conditions in Masan Bay. *Bulletin of National Fisheries Research and Development Agency*, 43, pp. 1-40.
- [14] Kim, J. B., S. Y. Lee, J. Yu, Y. H. Choi, C. S. Jung, and P. Y. Lee(2006), The Characteristics of Oxygen Deficient Water Mass in Gamak Bay, *Journal of the Korean society for marine environmental engineering*, Vol. 9, No. 4, pp. 216-224.
- [15] Kim, N. S., H. Kang, M. S. Kwon, H. S. Jang, and J. G. Kim(2016), Comparison of Seawater Exchange Rate of Small Scale Inner Bays within Jinhae Bay, *Journal of the Korean society for marine environment and energy*, Vol. 19, No. 1, pp. 74-85.
- [16] Kim, S. Y., Y. H. Lee, Y. S. Kim, J. H. Sim, M. J. Ye, J. W. Jeon, J. R. Hwang, and S. H. Jeon(2012), Characteristics of Marine Environmental in the Hypoxic Season at Jinhae bay in 2010, *Korean Journal of Nature Conservation* Vol. 6, No. 2, pp. 115-129.
- [17] Lee, T. H.(2015), Sediment Oxygen Consumption Rate and Hydrogen Sulfide Release by Dissolved Oxygen Depletion in Hypoxic Area of the Gamak Bay, Korea, *Journal of wetlands research*, Vol. 17, No. 3, pp. 293-302.
- [18] Lim, H. S., R. J. Diaz, J. S. Hong, and L. C. Schaffner(2006), Hypoxia and benthic community recovery in Korean coastal waters, *Marine Pollution Bulletin*, 52(11), pp. 1517-1526.
- [19] Lowery, T. A.(1998), Modelling estuarine eutrophication in the context of hypoxia, nitrogen loadings, stratification and nutrient ratios. *Journal of Environmental Management* 52(3), pp. 289-305.
- [20] McFadden, D.(1974), *Conditional logit analysis of qualitative choice behavior*, Academic Press, ISBN 0127761500, pp. 105-142.
- [21] NIFS(2009), Hypoxia in the coast of Korea, SP-2009-ME-021, pp. 3-100.
- [22] Pearson, T. H. and R. Rosenberg(1978), Macrobenthic succession on relation to organic enrichment and pollution of the marine environment, *Oceanogr, Mar. Biol, Ann. Rev.*, 16, pp. 229-311.
- [23] Rabalais, N. N., R. E. Turner, and D. Scavia(2002), Beyond science into policy: Gulf of Mexico hypoxia and the Mississippi River. *BioScience*, 52(2), pp. 129-142.
- [24] Richardson, L. F.(1920), The supply of energy from and to atmospheric eddies. *Pros. Roy. Soc. A* 97, pp. 354-373.
- [25] Simson, J., H. Brown, J. Matthews, and G. Allen(1990), Tidal straining, density, currents, and stirring in the control of estuarine Stratification, *Estuaries*, 13(2), pp. 125-132.
- [26] Väisälä, V.(1925), Über die Wirkung der Windschwankungen auf die Pilotbeobachtungen, *Soc. Sci. Fenn. Commentat. Phys.-Math.* 2(19), pp. 1-46.
- [27] Wiseman, W. J., N. N. Rabalais, R. E. Turner, S. P. Dinnel, and A. MacNaughton(1997), Seasonal and inter annual variability within the Louisianan coastal current: stratification and hypoxia, *Journal of Marine Systems*, 12(1-4), pp. 237-248.
- [28] Wu, R. S. S.(1982), Periodic defaunation and recovery in a subtropical epibenthic community, in relation to organic pollution. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 64(3), pp. 253-269.

Received : 2019. 12. 19.

Revised : 2020. 01. 28.

Accepted : 2020. 02. 25.