

# 간척지 내 부영양화된 호수 수괴의 간헐적 유출로 인한 천수만 저층수의 Hypoxia 발생과 영양염 분포 특성

이동관\* · 김기현\*\*† · 이재성\*\*\*

\*, \*\* 충남대학교 해양환경과학과, \*\*\* 한국해양과학기술원

## Hypoxia and Characteristics of Nutrient Distribution at the Bottom Water of Cheonsu Bay Due to the Discharge of Eutrophicated Artificial Lake Water

Dong-Kwan Lee\* · Ki-Hyun Kim\*\*† · Jae-Sung Lee\*\*\*

\*, \*\* Department of Oceanography and Ocean Environmental Sciences, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

\*\*\* Korea Institute of Ocean Science & Technology, Ansan 15627, Korea

**요 약** : 본 연구에서는 2010년 여름에 천수만에서 저층해수를 채집하여 용존산소와 영양염 농도를 측정하였다. 또한 benthic chamber내의 해수시료를 시계열로 채집하는 자동화된 Benthic Lander를 설치하여 해수-퇴적물간 영양염 플럭스를 측정하였다. 오염된 인공호수 유출수가 들어오는 천수만 북쪽에서는 저층수의 용존산소는 2 mg/l로 hypoxia의 존재 가능성이 확인되었다. 반면 남쪽 천수만 입구의 저층 용존산소는 5 mg/l이었다. 영양염은 용존산소와 반대의 분포 경향을 보였고, N/P ratio의 변화는 hypoxia에 의해 발생된 인산염의 탈착과 용출 때문으로 보인다. 만 북쪽 해역의 유기탄소 산화율과 산소소비율은 남쪽 만 입구 해역보다 약 2배 큰 값을 보였고, 영양염 benthic flux는 천수만 북쪽에서 4내지 6배 높았다. 이러한 결과는 해수-퇴적물간 물질 플럭스를 정확히 추정하기 위해서는 hypoxia의 역할에 대한 이해가 중요하다는 점을 시사해준다.

**핵심용어** : 빈산소, 부영양화된 물, 용존 산소, 저층 플럭스, 천수만

**Abstract** : In summer 2010, we measured the concentration of dissolved oxygen (DO) and nutrients in the water collected at the bottom of Cheonsu Bay, off the west coast of Korea. We also measured nutrient fluxes across the sediment-water interface by deploying a fully-automated benthic lander, which collected time-series water samples inside a benthic chamber. We confirmed on-going hypoxia in the northern parts of the bay where polluted lake water was discharged. DO content in the water at the bottom was 2 mg/l, compared to 5 mg/l at the mouth of the bay in the south. Nutrient concentrations showed a trend that was opposite to that of DO. The variation of N/P ratios implies phosphate desorption and a release of nutrients caused by hypoxia. The organic carbon oxidation rate and oxygen consumption rate in the northern parts of the bay were about twice as fast as those at the mouth of the bay. Benthic fluxes of nutrients in the northern part of the bay were 4 to 6 times higher than those at the mouth. Our results imply that it is important to understand the role of hypoxia events to make an accurate estimation of material fluxes across the sediment-water interface.

**Key Words** : Hypoxia, Eutrophicated water, Dissolved oxygen, Benthic flux, Cheonsu Bay

### 1. 서 론

일반적으로 수괴의 용존산소(DO, dissolved oxygen)가 전혀 없는 경우를 anoxic(무산소)이라 하고, hypoxia(빈산소)는 용존산소 2 mg/L 이하인 상태를 말한다(Bianchi et al., 2010; Fleddum

et al., 2011; Pretteterebner et al., 2011). Hypoxia는 부영양화된 환경에서 유기물 분해과정에 산소가 소비되어 발생하며(Yang and Hong, 1988; Rabalais et al., 2002; Kim and Kim, 2003; Kemp et al., 2005), 이와 같은 현상이 유지가 되면 서식하는 생물뿐만 아니라 생태계까지 유해한 영향을 끼칠 수 있다(Kodama et al., 2014; Zhang et al., 2016).

해수의 용존산소 포화율은 수온과 염분의 함수이다. 산소 용해는 연안해역이나 수심이 얇은 내만에서는 수온 염분뿐

\* First Author : kwan@cnu.ac.kr, 042-861-6431

† Corresponding Author : khkim@cnu.ac.kr, 042-861-6431

## 간척지 내 부영양화된 호수 수괴의 간헐적 유출로 인한 천수만 저층수의 Hypoxia 발생과 영양염 분포 특성

만 아니라 파랑, 조류, 일광, 담수유입, 산소요구물질(ODM, oxygen demanding material) 오염 등에 큰 영향을 받는다. 여름철 수온상승으로 산소용해도가 감소된 천해역에 유입된 다량의 ODM은 빠르게 산화되며 용존산소를 소비한다. 더구나 이때 상승된 수온과 강한 햇빛으로 촉진된 광화학적 반응으로 유기물 산화속도는 더욱 빨라지며 용존산소를 급감시켜 hypoxia를 발생시킬 수 있다.

충남 홍성군, 서산시, 태안군으로 둘러싸인 천수만은 1984년에 완공된 대규모 방조제 공사로 만 면적은 380 km<sup>2</sup>에서 179 km<sup>2</sup>로 감소되었다(So et al., 1998). 간척공사 이후 천수만 북부에는 조류 속도가 감소하여 퇴적물의 세립화가 진행되었다(Woo et al., 2005; Song et al., 2011). 이 세립질 퇴적물은 강한 조류에 의해 쉽게 재부유되어 수층에 유기물과 영양염을 공급하여 만 내부의 1차와 2차 생산력을 향상시킨다(Park et al., 2000). 천수만 내 동물생태계는 방조제 건설로 심하게 교란되어, 유기물 오염의 지표종인 대형 동물군이 방조제 근처에서 관찰되기도 한다(Park et al., 2006). 방조제 건설로 경작지와 2개의 인공호수가 형성되었으며, 빠른 도시화가 진행 중인 주변에서 생활하수와 농경지 유출수가 호수로 유입되고 있다. 인공호수내 물은 ODM과 영양염으로 심하게 오염되어 있고 그 악영향에 대해 보고된 바 있으나(Lim and Park, 1998), 오염된 호수 물은 수위조절을 위해 간헐적으로 배수된다. 강우량이 많은 여름철에는 배수량과 배수빈도가 크게 증가하고 수온 상승으로 이미 산소용해도가 감소된 해수에 다량 유입되는 ODM은 만 북쪽에서 hypoxia를 발생시키며(Kim and Lee, 2011) 천수만 일대의 수산업과 양식업에 큰 피해를 주는 것으로 알려져 있다. 천수만에서의 연구는 조류 특성(Jung et al., 2013) 혹은 생물학적 연구(Kwon et al., 2013; Jung et al., 2014) 또는 지형 구조(Ryu and Chang, 2005)에 관한 것이 대다수이며, hypoxia에 관한 연구는 그 출현이나 그 가능성을 시사한 연구(Choi, 2004; Ro and Choi, 2004)가 있었으나, hypoxia의 생지화학적 영향에 대한 내용은 현저히 부족한 실정이다.

이 연구의 목적은 천수만 해수의 영양염과 용존산소 분포를 조사하여 hypoxia의 발생가능성을 확인하고, 그 발생원인을 구명하고, 발생된 hypoxia가 만내 영양염 농도와 분포에 미치는 정성적 영향을 파악하는 것이다. 이 연구목표를 효과적으로 달성하기 위하여 이 연구를 통하여 얻어진 자료와 함께 이미 발표된 일부 자료를 인용하여 비교할 것이다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 연구지역

천수만은 한국 중부 서해안에 위치한 해안선 총연장 151 km,

면적 179 km<sup>2</sup>, 평균수심 20 m인 반폐쇄성 천해성 내만이다(Fig. 1). 만 내부의 해수는 반일주조인 조류에 의해 남쪽의 좁은 만 입구를 통해 외해수와 교환된다. 안면도 북단과 태안반도 사이의 좁은 수로를 통한 해수 유통은 무시할 정도로 작은 규모이다. 만 내부에서 조차는 대조기 6.3 m, 소조기 2.9 m, 평균 조차 4.6 m이며, 조류속은 중앙부 조류곡에서 낙조류 0.7 m s<sup>-1</sup>이고 창조류 1.1 m s<sup>-1</sup>이다(Choi, 2004). 천수만 저층의 퇴적물은 방조제 건설후 급속하게 니질 퇴적상으로 변하여 최근에는 천수만의 대다수 지역이 니질 퇴적상을 나타낸다(Lee and Park, 1998).

### 2.2 해수 시료 채집 및 분석

천수만에서 니스킨 채수기를 이용하여 표층수와 저층수를 2010년 7월에는 10개 정점에서, 8월과 10월에는 정점을 추가하여 14개 정점에서 채수하였다(Fig. 1). 채집된 해수시료는 현장에서 측정항목별로 즉시 전처리 후 냉장상태로 실험실로 옮겨져 영양염은 비색법으로 용존산소는 윙클러 적정법으로 분석되었다(Grasshoff et al., 1999). 또한 현장에서

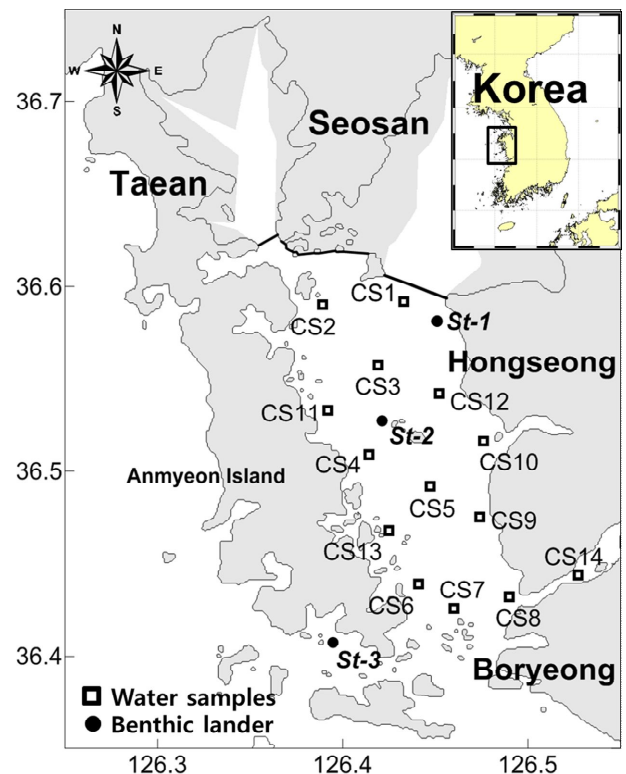


Fig. 1. Map showing the location of 14 stations for bottom water samples (CS, □) and 3 stations for a benthic lander deployment (St, ●). Inserted is an index map showing the location of Cheonsu Bay, west coast of Korea.

수온과 염분을 CTD로 측정하여 산소포화도 계산에 이용하였다.

### 2.3 Benthic Lander 설치와 코어시료 채집

2010년 7월에는 해수시료 외에 천수만 3개 정점에서 자동화된 Benthic Lander를 설치하여 해수-퇴적물간 물질 플럭스를 측정하였다(Fig. 1). 랜더의 본체 주요부분은 benthic chamber와 소형 컴퓨터로 구성되어 있다. benthic chamber는 바닥면이 없는 불투명한 상자로서 내부에는 교반기, 산소미세전극과 syringe 채수기가 설치되어 있으며, chamber 내부의 해수는 소형 컴퓨터에 설정된 시간간격에 따라 자동으로 채수된다. 랜더의 규격과 기능에 대한 상세한 정보는 Lee et al.(2011)에 보고되어 있다. 또한 랜더를 설치한 3개 정점에서 과학잠수사의 도움을 받아 퇴적물 코어도 채집하였다. 질소가 연속 주입되는 glove bag 내에서 시린지 채수기로 채집된 시료를 여과하고, 코어 시료는 토양수분 채집기(Eijkelkamp, Rhizon 모델)를 이용하여 공극수를 분리 후 시린지 필터로 여과하여 영양염 분석하기 전까지 냉동 보관되었다.

## 3. 결과 및 토의

### 3.1 저층수의 용존산소와 Hypoxia

천수만 표층수의 용존산소 농도는 인공호수의 배수구 쪽으로 갈수록 감소하였으나, 모든 조사기간을 통하여 산소포화도의 최소값은 50% 정도로써 hypoxia를 일으킬 만큼 낮아지는 경우는 없었다. 따라서 표층수 자료는 여기에 제시하

Table 1. Mean values of dissolved oxygen (DO) and nutrients in bottom waters. Stations were grouped into N (northern part) including CS1 and CS2, and S (southern part) including CS6, CS7 and CS8

		DO (mg/L)	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (μM)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (μM)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (μM)	Si(OH) <sub>4</sub> (μM)
Jul. 2010	N	3.65	0.29	11.80	18.10	34.07
	S	5.07	0.28	10.62	5.79	10.13
Aug. 2010	N	2.56	0.21	7.94	23.89	44.89
	S	4.12	0.09	1.33	1.03	13.16
Oct. 2010	N	3.95	0.10	6.32	4.32	6.46
	S	3.96	0.13	7.20	2.06	5.34

지 않는다.

천수만 저층수의 용존산소 분포는 남쪽 만 입구에서 낮고 북쪽으로 갈수록 점차 감소하는 경향을 보였다(Table 1). 특히 8월에 북쪽해역(CS-2)에서 2.1 mg/L의 가장 낮은 값을 보였으며, 남쪽 만 입구(CS-7)에서는 그 두배가 넘는 4.3 mg/L의 농도를 보였다.

저층수의 산소포화도는 만 북쪽 배수구에 인접한 정점 CS-2에서 저층수 산소포화도의 최소값이 출현하였으며, 7월에 최소값 46.6% (평균 61.6%), 8월에 최소값 30.8% (평균 50.3%)이었다(Fig. 2). 10월에는 수온이 16°C 이하로 감소하였으나 산소포화도 평균값은 47.9%로 7월이나 8월보다 더욱 감소하였다. 조사기간 내내 저층수의 산소포화도 최대값은 만 입구의 정점 CS-7에서 나타났다.

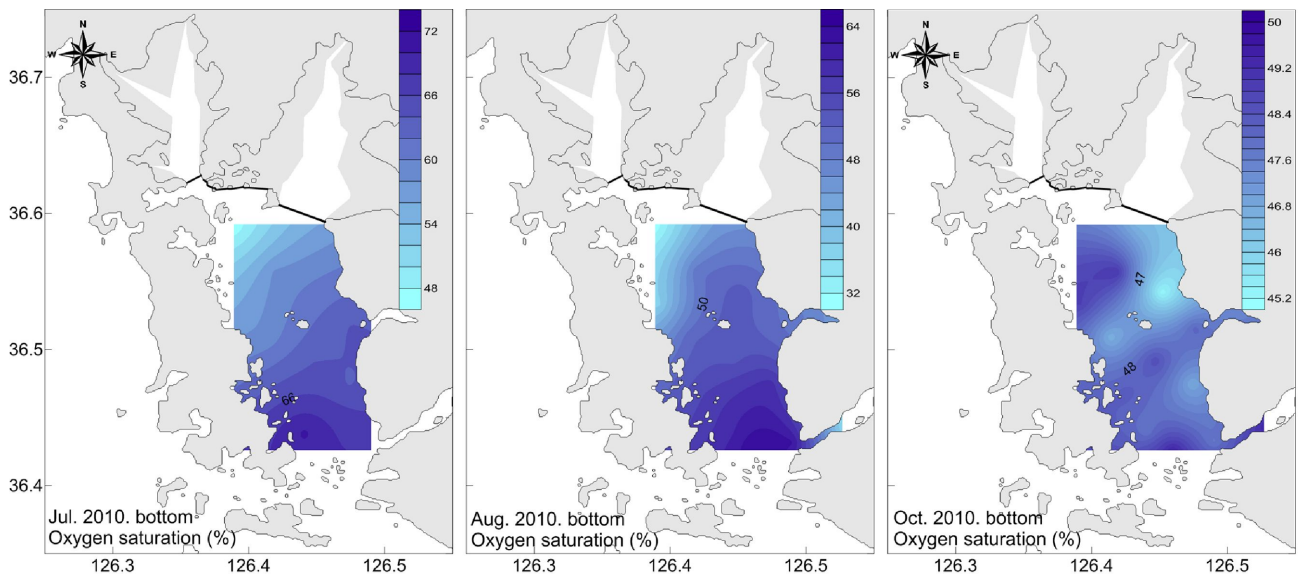


Fig. 2. Contour maps showing the distribution of oxygen saturation (%) in the bottom water of Cheonsu Bay in July, August and October 2010. Color scales are shown in each map.

간척지 내 부영양화된 호수 수괴의 간헐적 유출로 인한 천수만 저층수의 Hypoxia 발생과 영양염 분포 특성

8월 조사 때 저층수 DO는 정점 CS-2에서 포화농도의 30%에 접근하였다. 정점 CS-2와 서북쪽 부남호 배수구 사이의 해역은 양식장이 밀집되어 조사할 수 없었지만 저층수 DO는 분명히 더욱 낮았을 것이다. 이는 조사당시 천수만 북부해역 일대의 저층에 hypoxia가 존재하고 있었음을 시사한다. 이처럼 인공호수 물이 유입되는 천수만 북부에서는 여름철에 충분히 hypoxia 발생이 가능하다.

대부분의 어류가 30% 이하에서는 생존할 수 없음에도 불

구하고 이 해역에 가두리 양식장이 대규모로 설치되어 운영 중인 것은 표층수 DO가 저층수보다 높기에 가능한 일이다. 아드리아해 북부해역에서는 hypoxia의 발달로 1970년대에서 80년대에 다량의 저서생물이 죽었다고 보고되었다(Giani et al., 2012). 천수만에서도 저층 hypoxia가 약간 확장된다면 양식어의 대량폐사가 일어날 수 있는 대단히 위험한 일이다. 그러나 이러한 문제는 이 연구의 관점 밖이므로 이 논문에서는 논의하지 않겠다.

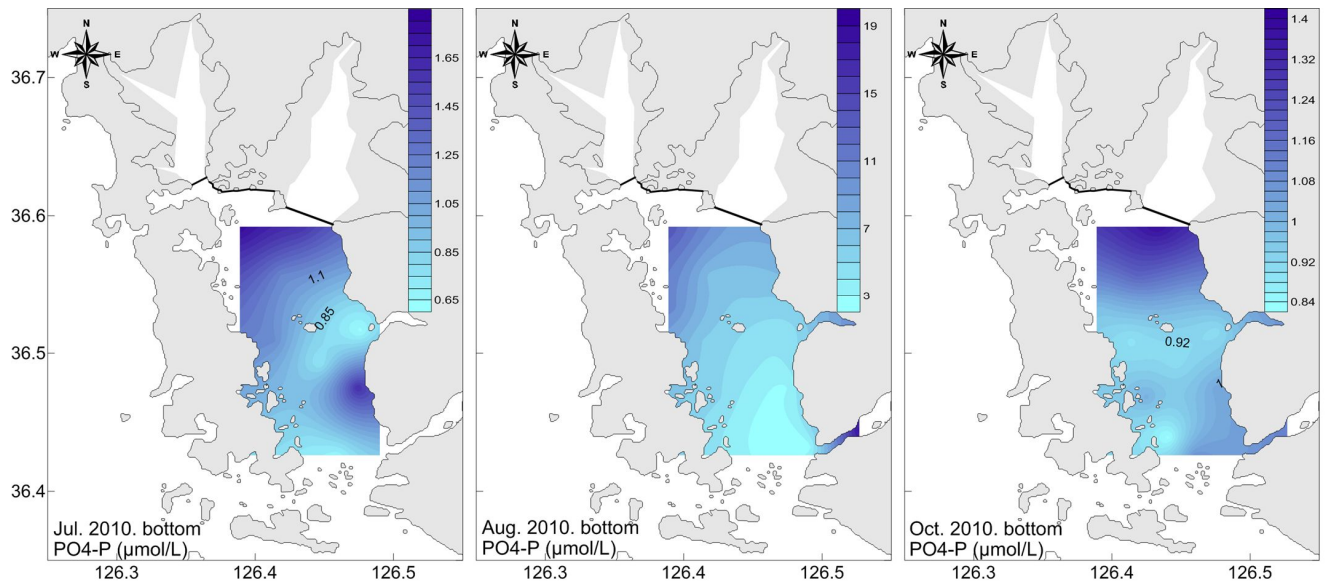


Fig. 3. Contour maps showing the distribution of phosphate concentration in the bottom water of Cheonsu Bay in July, August and October 2010. Color scales are shown in each map.

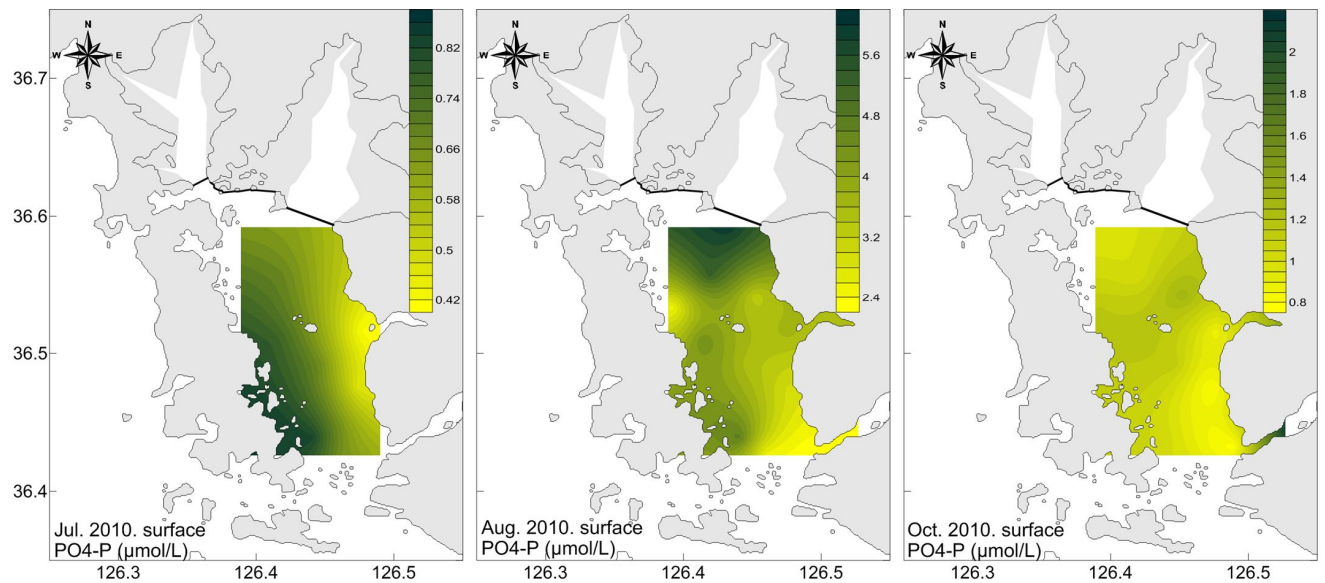


Fig. 4. Contour maps showing the distribution of phosphate concentration in the surface water of Cheonsu Bay in July, August and October 2010. Color scales are shown in each map.

### 3.2 영양염 공간 분포

천수만 저층수의 영양염 농도분포는 용존산소와 반대의 분포 경향을 보였으며, 남쪽 만 입구에서 낮고 만 북쪽으로 갈수록 점차 증가하여 배수구 가까운 북쪽 정점에서 최고값을 보였다. Fig. 3을 보면 저층수의 인산염(상관계수: -0.822, 신뢰구간: 95%) 농도분포가 대표적으로 이런 경향을 보여주고, 용존 무기 질소(상관계수: -0.532, 신뢰구간: 95%)와 규산염(상관계수: -0.714, 신뢰구간: 95%) 농도도 북쪽으로 갈수록 증가하는 동일한 경향을 보인다(Table 1). 이와 같이 저층수의 영양염 농도가 북쪽으로 갈수록 증가하는 뚜렷한 경향은 천수만의 주된 영양염 공급원(source)이 부영양화된 인공호수의 유출수라는 점을 강력히 시사한다. 간혹 남동쪽 오천만 입구의 정점 CS-8과 CS-14에서 아질산염이나 암모늄염의 농도가 약간 증가하는 것으로 보아 일부 영양염은 오천만에서 보조적으로 공급되는 것으로 보인다.

저층수에서 대표적인 경향성을 보여주었던 인산염은 8월의 표층수에서 비슷한 경향을 보였으나 그 외 조사시기에는 다른 경향을 보여주었다(Fig. 4). 다른 자료를 제시하지는 않지만, 표층수의 영양염 농도는 천수만 북쪽으로 갈수록 증가하는 경향을 보이기는 하지만 그 경향성이 뚜렷하지는 않았다. 표층수의 암모늄염이나 아질산염 농도는 만의 남동쪽 오천만 입구나 어류양식장이 밀집된 남서쪽 안면도 연안에 높은 값이 나타나기도 하였다.

### 3.3 Hypoxia 영향에 의한 영양염의 생지화학적 특성

이 연구를 위한 천수만 현장조사와 동시에 실시된 Bottom Lander 설치와 공극수 분석을 통한 물질 플럭스는 별도의 논문으로 이미 자세히 보고되었다(Kim and Lee, 2011; Lee et al., 2012). 여기서는 발표된 자료 중에서 이 논문의 해석에 필요한 일부 자료만을 인용하였다(Table 2).

천수만 저층 해역에서 N/P ratio는 7월에  $18.8 \pm 3.6$ 로 가장 높았으며, 8월에는  $2.3 \pm 1.5$ 로 가장 낮았고, 10월은  $9.7 \pm 1.5$ 이었다. 천수만과 같이 반폐쇄성 내만으로 알려진 진해만에서 여름철에 질산염을 과다 함유한 육수유입의 영향으로 N/P ratio가 높다는 연구 결과가 있다(Lee et al., 1994). 천수만에서도 간헐적인 담수 유입의 영향으로 볼 수 있으나 본 연구에서는 hypoxia가 미친 영향으로 해석해보았다.

일시적인 유기물 공급으로 표층에서는 식물플랑크톤의 증식이 발생하고 그 후 사멸하여 인산염을 배출하게 된다. 배출된 인산염은 재광물화를 통해 증식에 바로 사용되거나 입자 친화적인 특성 때문에 흡착되어 가라앉을 수 있다(House et al., 1995). 입자에 흡착된 인산염은 산소가 부족한 환경에서 탈착되어 수층의 인산염 농도를 증가시킬 수 있다(Van der Zee et al., 2007). 또한 저층에서 발생한 hypoxia는 퇴적물에서 저층수로 인을 용출시킬 수 있으며(Davidson et al.,

Table 2. Benthic nutrient fluxes ( $F_{in situ}$ : results of lander sample,  $F_{diff}$ : results of core sample,  $mmol m^{-2} d^{-1}$ ), oxygen consumption rates (OCR,  $mmol O_2 m^{-2} d^{-1}$ ), carbon oxidation rates (COR,  $mmol C m^{-2} d^{-1}$ ) across the sediment-water interface in Cheonsu Bay (Lee et al., 2012)

	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>		OCR	COR
	$F_{in situ}$	$F_{diff}$		
St-1	0.52	0.08	50.4	55
St-2	0.37	0.05	36.4	33
St-3	-0.002	0.04	25.6	29

2012), 이로 인해 저층수의 인산염 농도의 증가로 N/P ratio가 작아지는 이유를 설명해준다(Kang et al., 1999). 7월에 측정된 인산염 플럭스도 살펴보면 lander를 이용한 결과와 코어의 공극수로 측정된 플럭스 모두 산소 농도가 낮은 북쪽에서 더 높았다(Table 2). 8월의 플럭스 값은 없지만 산소 농도가 더 낮았기 때문에 퇴적물에서 해수 용출되는 인산염 농도는 증가하였을 것으로 추정된다. N의 감소로도 N/P ratio를 작아지게 할 수 있다. 일반적으로 탈질산화 작용은 산소가 고갈된 곳에서 진행되어 질산염의 제거 기작으로 알려져 있다(Gruber and Sarmiento, 1997). 그리고 성층이 형성되어 표층수와 혼합이 쉽지 않고 유기물 분해로 인하여 수괴 중층에 산소 농도가 최소가 되는 산소 최소층이 존재하는데 이와 같이 용존산소 농도가 낮은 곳에서도 탈질산화가 진행된다고 보고되었다(Kim and Min, 2013; Gutknecht et al., 2013). 우리나라 하구 갯벌에서 질산염이 퇴적물로 제거가 되었다는 보고도 있다(Heo et al., 2011). 하지만 본 연구에서는 7월과 8월의 질산염 농도 변화는 작았고 인산염의 농도 변화가 컸기 때문에 저층수의 인산염 농도 증가로 인해 N/P ratio가 감소한 것으로 추측된다.

본 연구에서는 천수만 전 해역의 N/P ratio를 살펴본 것이며, hypoxia는 주로 방조제 앞에서 나타났을 것이기 때문에 북부해역에서는 입자에서 탈착된 인의 비가 증가하고 전반적으로는 퇴적물에서의 용출 때문에 인의 비가 증가하여 N/P ratio가 크게 감소가 하였다 판단된다.

천수만 북부해역과 남부해역의 산소소비율 및 유기물 산화율은 남쪽 만 입구보다 이 값들은 약 2배 이상 큰 수치를 보였다(Table 2). 이는 만 북부에서는 인공호수로부터 유입된 산소요구물질의 산화의 영향으로 판단된다. 영양염 benthic flux도 같은 경향으로 남쪽 만 입구보다 천수만 북쪽에서 4 내지 6배 높은 것으로 나타났다. 산소미세전극으로 확인된 바에 의하면(Lee et al., 2012), 천수만 북쪽 유기물 함량이 높은 퇴적물은 퇴적물-해수 경계면 직하 2~3 mm에 산화-환원 경계면(redox front)이 나타나며, 이보다 깊은 곳의 퇴적 유기



물은 빠른 혐기성 분해가 일어나며 공극수를 통해 위쪽으로 확산되어 저층수에 영양염을 공급하는 것으로 해석된다.

### 3.4 빠른 반응과 느린 반응

천수만 저층수의 용존산소 농도는 북쪽으로 갈수록 감소하며 이와 반대로 모든 영양염 농도는 증가하였다. 이러한 경향성은 천수만 표층퇴적물의 산소소비율과 퇴적층에서 저층수를 향한 영양염의 확산플럭스가 북쪽으로 갈수록 증가하는 연구결과와 일치한다(Kim and Lee, 2011; Lee et al., 2012).

특히 여름철 수온 상승기에 이처럼 뚜렷한 경향성이 나타나는 이유는 천수만에서 다음 두 가지 반응이 동시에 진행되었기 때문일 것이다.

첫째는 “느린 반응”으로, 방조제와 같은 인공 구조물 건설 이후 세립한 퇴적물이 주로 쌓이게 되는데(Lee and Park, 1998), 이는 조류의 세기가 약화되어 나타나는 현상이다(Kim et al., 2006). 천수만에서도 이와 같은 현상이 나타나며 해안선이 후퇴하는 여름철에 퇴적되는 경향이 두드러진다(Ryu and Chang, 2005). 세립한 퇴적물의 입자 표면적은 조립한 퇴적물의 표면적보다 크기 때문에 많은 유기물이 흡착될 수 있다. 천수만 북쪽 인공호수에서 장기간 유출된 산소요구물질은 위와 같은 세립질 퇴적물로 퇴적층에 축적되며 조류에 의해 재부유된 세립질 퇴적물이 점차 남쪽으로 퍼지나가며 퇴적층 표면에서 유기물 산화와 영양염 용출이 천천히 진행된다(Lee et al., 2012).

둘째는 “빠른 반응”으로, 여름철 인공호수 수위조절을 위해 배수 빈도가 증가하면 다량의 산소요구물질이 천수만으로 유입된다. 오염된 담수의 인위적인 유입으로 염분, 열적 성층이 발생하고(Jung et al., 2013; Lee et al., 2009), 천수만으로 방류된 유입물은 약 1시간 후면 잔차류에 영향을 끼칠 만큼 빠른 속도로 만 중앙부까지 도달한다(Jung et al., 2013). 해수중 오염된 부유물이 남쪽으로 확산되면 여름철 상승된 수온으로 빠르게 산화되어 산소소비와 영양염 용출이 진행된다. 도쿄만에서는 플랑크톤 생체찌꺼기에 의해 저층에 hypoxia가 발생할 수 있었고(Horiguchi et al., 2006), 부영양화된 습지에서 표층 수온이 30°C 이상일 때 수심 3m 이하에서도 hypoxia가 나타났다(Bishop et al., 2006)는 두 보고에 의하면 부유물의 확산과 표층 수온 상승이 빠른 반응의 주요 요소인 것을 시사한다.

천수만 내에서는 두 가지 반응이 항상 병행하여 진행되었지만, 특히 여름철 수온상승기에는 산소용해도 감소, 유기물 산화속도 증가, 강한 태양빛으로 인한 광화학적 반응촉진, 배수로 인한 산소요구물질 부하량 증가 등이 복합적으로 작용하여 “빠른 반응”이 더욱 가속되면 두 반응의 시그널이 중첩되며 단시간 내에 충분히 hypoxia를 발생시킬 수 있을 것이다.

## 4. 요약 및 결론

여름철 수온상승기에 산소요구물질로 오염된 인공호수의 유출수가 천수만 북부 해역 일대에 저산소 수층, 즉 hypoxia를 발생시킬 가능성을 확인하고, 발생된 hypoxia가 만내 물질순환에 미치는 영향을 파악하기 위하여 천수만 내 2010년 7월에 10개, 8월, 10월에 14개 정점에서 해수를 채수하여 용존산소와 영양염을 분석하였다.

천수만 저층 해수의 산소포화도는 인공호수의 배수구에 가까운 최북단 정점에서 30% 이하로 감소하는 경향을 보였다. 심지어 수온이 16°C 가까이 내려가는 10월에도 저층해수의 산소포화도 평균은 48% 정도의 매우 낮은 값이었다.

이 연구에서 얻어진 저층수의 용존산소와 영양염 분포 경향은 8월 조사 당시에 천수만 북부 해역에 hypoxia가 진행되고 있었음을 보여주고 있으며, 그 발생 원인이 오염된 인공호수의 유출수 때문임을 시사하고 있다(Kim and Lee, 2011). 또한 hypoxia의 영향으로 입자에서 탈착된 인과 퇴적물에서 용출된 인으로 인해 N/P ratio가 여름철 급격히 변하는 것도 확인하였다.

저층상자 설치나 퇴적물 공극수 분석, 산소미세전극 측정 등 다양한 방법을 통하여 추정된 자료를 보면, DO가 낮은 천수만 북쪽 퇴적층의 유기탄소 산화율과 산소소비율은 남쪽 만 입구는 이보다 2배 이상 높은 값을 보였다. 이는 천수만 북쪽에서는 인공호수로부터 다량 유출된 부유 유기물입자 산화(“빠른 반응”)에 해수중 용존산소가 이미 고갈되어 저층퇴적물 산화작용(“느린 반응”)의 속도가 느려진 것으로 설명할 수 있다. 영양염 benthic flux도 남쪽 만 입구보다 천수만 북쪽에서 4내지 6배 큰 것으로 나타났으며, 이는 용존산소가 낮고 유기물 함량이 높은 만 북쪽 퇴적층에서는 해수-퇴적물 경계면 아래 2~3 mm 깊이에 redox front의 존재가 확인되며, 그 아래 퇴적 유기물은 빠른 혐기성 분해로 영양염이 용출되어 저층수로 확산되기 때문일 것이다.

이러한 연구결과를 종합하여 판단하면 일반적으로 천수만 북부해역의 저층에서는 11월부터 이듬해 5월까지 해수 수온이 낮은 때를 제외하고 늦은 봄부터 가을까지는 hypoxia가 빈번히 발생할 가능성을 시사하고 있다. 비록 지속적으로 존재하지는 않지만 hypoxia의 빈번한 간헐적 출현이 수산업과 양식어업뿐 아니라 연안 생태계에 미치는 영향이 지대하므로 철저히 모니터링하여야 할 것이다.

## 후 기

이 연구를 위해 현장과 실험실에서 노고를 아끼지 않았던 충남대학교 해양학과와 고 김승수 석사 및 해양방사화학실의 모든 동료들과 심사위원분들께 진심어린 감사사를 드립니다.

다. 이 연구는 2010년도 충남대학교 학술연구비와 한국해양과학기술원(PE99383, PE99414)의 지원을 받아 수행되었습니다.

## References

- [1] Bianchi, T. S., S. F. DiMarco, J. H. Cowan Jr., R. D. Hetland, P. Chapman, J. W. Day and M. A. Allison(2010), The science of hypoxia in the Northern Gulf of Mexico: A review, *Sci. Total Environ*, Vol. 408, pp. 1471-1484.
- [2] Bishop, M. J., S. P. Powers, H. J. Porter and C. H. Peterson(2006), Benthic biological effects of seasonal hypoxia in a eutrophic estuary predate rapid coastal development, *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, Vol. 70, pp. 415-422.
- [3] Choi, Y. H.(2004), Development of Water Quality Prediction Model in Chunsu Bay, Ph.D. Thesis, Chungnam National University, Korea. p. 7.
- [4] Davidson, K., R. J. Gowen, P. Tett, E. Bresnan, P. J. Harrison, A. McKinney, S. Milligan, D. K. Mills, J. Silke and A. M. Crooks(2012), Harmful algal blooms: How strong is the evidence that nutrient ratios and forms influence their occurrence?, *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, Vol. 115, pp. 399-413.
- [5] Fledrum, A., S. G. Cheung, P. Hodgson and P. K. S. Shin(2011), Impact of hypoxia on the structure and function of benthic epifauna in Tolo Harbour, Hong Kong, *Mar. Poll.*, Vol. 63, pp. 221-229.
- [6] Giani, M., T. Djakovac, D. Degobbi, S. Cozzi, C. Solidoro and S. F. Umani(2012), Recent changes in the marine ecosystems of the northern Adriatic Sea, *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, Vol. 115, pp. 1-13.
- [7] Grasshoff, K., K. Kremling and M. Ehrhardt(1999), *Methods of Seawater Analysis*, Wiley-VCH, Weinheim, Germany, p. 632.
- [8] Gruber, N. and J. L. Sarmiento(1997), Global patterns of marine nitrogen fixation and denitrification, *Global Biogeochem. Cycles*, Vol. 11, No. 2, pp. 235-266.
- [9] Gutknecht, E., I. Dadou, B. LeVu, G. Cambon, J. Sudre, V. Garçon, E. Machu, T. Rixen, A. Kock, A. Flohr, A. Paulmier and G. Lavik(2013), Coupled physical/biogeochemical modeling including O<sub>2</sub>-dependent processes in the Eastern Boundary Upwelling Systems: application in the Benguela, *Biogeosciences*, Vol. 10, No. 6, pp. 3559-3591.
- [10] Heo, N. W., J. Y. Lee, J. W. Choi and S. M. An(2011), Nitrogen Removal Via Sediment Denitrification and Its Seasonal Variations in Major Estuaries of South Coast of Korean Peninsula, *J. Korean Soc. Oceanogr.*, Vol. 16, No. 2, pp. 81-96.
- [11] Horiguchi, F., K. Nakata, N. Ito and K. Okawa(2006), Risk assessment of TBT in the Japanese short-neck clam (*Ruditapes philippinarum*) of Tokyo Bay using a chemical fate model, *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, Vol. 70, pp. 589-598.
- [12] House, W. A., F. H. Denison and P. D. Armitage(1995), Comparison of the uptake of inorganic phosphorus to a suspended and stream bed-sediment, *Water Res.*, Vol. 29, No. 3, pp. 767-779.
- [13] Jung, K. Y., Y. J. Ro and B. J. Kim(2013), Tidal and Sub-tidal Current Characteristics in the Central part of Chunsu Bay, Yellow Sea, Korea during the Summer Season, *J. Korean Soc. Oceanogr.*, Vol. 18, No. 2, pp. 53-64.
- [14] Jung, R. H., I. S. Seo, W. C. Lee, H. C. Kim, S. R. Park, J. B. Kim, C. W. Oh and B. M. Choi(2014), Community Structure and Health Assessment of Macrobenthic Assemblages at Spring and Summer in Cheonsu Bay, West Coast of Korea, *J. Korean Soc. Oceanogr.*, Vol. 19, No. 4, pp. 272-286.
- [15] Kang, C. K., P. J. Kim, W. C. Lee and P. Y. Lee(1999), Nutrients and phytoplankton blooms in the southern coastal waters of Korea: I. The elemental composition of C, N, and P in particulate matter in the coastal bay systems, *J. Korean Soc. Oceanol.*, Vol. 34, No. 2, pp. 86-94.
- [16] Kemp, W. M., W. R. Boynton, J. E. Adolf, D. F. Boesch, W. C. Boicourt, G. Brush, J. C. Cornwell, T. R. Fisher, P. M. Glibert, J. D. Hagy, L. W. Harding, E. D. Houde, D. G. Kimmel, W. D. Miller, R. I. E. Newell, M. R. Roman, E. M. Smith and J. C. Stevenson(2005), Eutrophication of Chesapeake Bay: historical trends and ecological interactions, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, Vol. 303, pp. 1-29.
- [17] Kim, D. S. and S. W. Kim(2003), Mechanism of Oxygen-Deficient Water Formation in Jindong Bay, Korea. *J. Oceanol. Soc. Korea.*, Vol. 8, No. 2, pp. 177-186.
- [18] Kim, I. N. and D. H. Min(2013), Temporal variation of summertime denitrification rates in the Texas-Louisiana inner shelf region in the Gulf of Mexico: A modeling approach using the extended OMP analysis, *Cont. Shelf Res.*, Vol. 66, pp. 49-57.
- [19] Kim, K. H. and J. S. Lee(2011), Hypoxia Events in Cheonsu Bay, West Coast of Korea, Triggered by Discharge of Eutrophicated Water from Artificial Lakes, *Goldschmidt 2011. Euro. Assoc. Geochem. Aug. 14-19, 2011, Prague, Czech.*
- [20] Kim, T. I., B. H. Choi and S. W. Lee(2006), Hydrodynamics and sedimentation induced by large-scale coastal developments

- in the Keum River Estuary, Korea, *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, Vol. 68, pp. 515-528.
- [21] Kodama, K., Y. Tajima, T. Shimizu, S. Ohata, H. Shiraishi and T. Horiguchi(2014), Disturbance of recruitment success of mantis shrimp in Tokyo Bay associated with effects of hypoxia on the early life history, *Mar. Pollut. Bull.*, Vol. 85, pp. 433-438.
- [22] Kwon, S. Y., J. H. Lee, J. M. Hong, H. B. Hwang and T. W. Lee(2013), Change in Species Composition of Shallow Water Fish at the Namdang Beach after Dike Construction in Cheonsu Bay, *Korean J. Ichthyol.*, Vol. 25, No. 2, pp. 53-64.
- [23] Lee, J. H. and H. S. Park(1998), Community structures of macrobenthos in Chonsu Bay, Korea, *J. Korean Soc. Oceanol.*, Vol. 33, pp. 18-27.
- [24] Lee, J. S., K. H. Kim, J. H. Shim, J. H. Han, Y. H. Choi and B. J. Khang(2012), Massive sedimentation of fine sediment with organic matter and enhanced benthic-pelagic coupling by an artificial dyke in semi-enclosed Chonsu Bay, Korea, *Mar. Pollut. Bull.*, Vol. 64, pp. 153-163.
- [25] Lee, J. S., Y. T. Kim, S. J. Hong, S. H. Kim, J. H. Han, S. S. Kim, J. H. Hyun and K. H. Shin(2011), Influence of sea squirt (*Halocynthia roretzi*) aquaculture on benthic-pelagic coupling in coastal water of the South Sea in Korea, *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, Vol. 99, pp. 10-20.
- [26] Lee, P. Y., C. K. Kang, J. S. Park and J. S. Park(1994), Annual change and C:N:P ratio in particulate organic matter in Chingae Bay, Korea, *J. Korea. Soc. Oceanol.*, Vol. 29, No. 2, pp. 107-118.
- [27] Lee, Y. G., K. G. An, P. T. Ha, K. Y. Lee, J. H. Kang, S. M. Cha, K. H. Cho, Y. S. Lee, I. S. Chang, K. W. Kim and J. H. Kim(2009), Decadal and seasonal scale changes of an artificial lake environment after blocking tidal flows in the Yeongsan Estuary region, Korea, *Sci. Total Environ.*, Vol. 407, pp. 6063-6072.
- [28] Lim, H. S. and K. Y. Park(1998), Community Structure of the Macrobenthos in the Soft Bottom of Yongsan River Estuary, Korea 2. The Occurrence of Summer Hypoxia and Benthic Community, *J. Korean Fish. Soc.*, Vol. 31, No. 3, pp. 343-352.
- [29] Park, H. S., H. S. Lim and J. S. Hong(2000), Spatio- and temporal patterns of benthic environment and macrobenthos community on subtidal soft-bottom in Chonsu Bay, Korea, *J. Korean Fish. Soc.*, Vol. 33, No. 3, pp. 262-271.
- [30] Park, H. S., R. S. Kang and J. H. Lee(2006), Distribution Patterns of the Dominant Macrobenthos and the Benthic Environments on Subtidal Soft-bottom in Chonsu Bay, Korea, *J. Korean Fish. Soc.*, Vol. 39, pp. 214-222.
- [31] Pretterebner, K., B. Riedel, M. Zuschin and M. Stachowitsch (2011), Hermit crabs and their symbionts: Reactions to artificially induced anoxia on a sublittoral sediment bottom, *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, Vol. 411, pp. 23-33.
- [32] Rabalais, N. N., E. Turner and D. Scavia(2002), Beyond science into policy: Gulf of Mexico hypoxia and the Mississippi River, *BioScience*, Vol. 52, No. 2, pp. 129-142.
- [33] Ro, Y. J. and Y. H. Choi(2004), Application of realtime monitoring of oceanic conditions in the coastal water for environmental management, *J. Korean Soc. Oceanol.*, Vol. 39, No. 2, pp. 148-154.
- [34] Ryu, S. O. and J. H. Chang(2005), Characteristics of Tidal Beach and Shoreline Changes in Chonsu Bay, West Coast of Korea, *J. Korean Earth Sci. Soc.*, Vol. 26, No. 6, pp. 584-596.
- [35] So, J. K., K. T. Jung and J. W. Chae(1998), Numerical Modeling of Changes in Tides and Tidal Currents Caused by Embankment at Chonsu Bay, *J. Ocean Eng. Technol.*, Vol. 10, No. 4, pp. 151-164.
- [36] Song, Y. H., M. S. Choi and Y. W. Ahn(2011), Trace metals in Chun-su Bay sediments, *J. Korean Soc. Oceanogr.*, Vol. 16, No. 4, pp. 169-179.
- [37] Van der Zee, C., N. Roelvros and L. Chou(2007), Phosphorus speciation, transformation and retention in the Scheldt estuary (Belgium/The Netherlands) from the freshwater tidal limits to the North Sea, *Mar. Chem.*, Vol. 106, pp. 76-91.
- [38] Woo, H. J., J. U. Choi, J. H. Ryu, S. H. Choi and S. R. Kim(2005), Sedimentary Environments in the Hwangdo Tidal Flat, Cheonsu Bay, *J. Korean Wetlands Soc.*, Vol. 7, No. 2, pp. 53-67.
- [39] Yang, D. B. and J. S. Hong(1988), On The Biogeochemical Characteristics of Surface Sediments in Chinhae Bay in September 1983, *Bull. Korean Fish. Soc.*, Vol. 21, No. 4, pp. 195-205.
- [40] Zhang, J., T. Xiaob, D. Huangc, S. M. Liud and J. Fange(2016), Editorial: Eutrophication and hypoxia and their impacts on the ecosystem of the Changjiang Estuary and adjacent coastal environment, *J. Mar. Syst.*, Vol. 154, pp. 1-4.

Received : 2016. 10. 27.

Revised : 2016. 12. 20.

Accepted : 2016. 12. 28.



Appendix 1. Data matrix on the bottom waters in Cheosu Bay, west coast of Korea, in July, August and October 2010.

Month	St. No.	Temp. (°C)	Sal. (psu)	DO (mg/L)	Sat. (%)	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Si(OH) <sub>4</sub>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>
JUL.	CS 1	23.0	31.4	3.88	54.3	0.39	7.73	16.97	32.77	1.60
	CS 2	21.4	31.5	3.42	46.6	0.20	15.86	19.22	35.37	1.77
	CS 3	21.6	32.3	4.24	58.3	0.17	8.26	13.08	22.67	1.19
	CS 4	21.3	31.6	4.32	58.8	0.20	9.37	13.53	22.00	1.16
	CS 5	20.8	31.6	4.74	63.9	0.17	7.91	7.43	13.47	0.75
	CS 6	21.0	31.7	5.19	70.3	0.20	12.12	6.21	12.47	0.79
	CS 7	20.9	31.7	5.05	68.3	0.22	9.02	5.85	7.17	0.67
	CS 8	21.3	31.7	4.96	67.4	0.44	10.71	5.29	10.77	0.93
	CS 9	21.0	31.6	4.72	63.9	0.22	9.60	7.13	13.33	1.61
	CS 10	21.1	31.6	4.73	64.2	0.15	7.91	5.70	15.30	0.63
AUG.	CS 1	26.5	28.9	3.01	44.2	0.16	6.00	12.61	35.85	8.88
	CS 2	26.4	28.7	2.10	30.8	0.27	9.88	35.16	53.93	13.78
	CS 3	26.9	29.1	3.32	49.1	0.11	18.15	6.15	25.11	6.73
	CS 4	27.1	29.1	3.45	51.2	0.11	5.06	30.06	19.63	5.94
	CS 5	27.2	29.3	3.59	53.5	0.11	3.30	1.51	18.20	4.47
	CS 6	27.3	29.3	3.95	58.9	0.09	1.68	1.37	15.28	3.29
	CS 7	27.2	29.5	4.26	63.5	0.05	0.78	0.42	12.51	2.61
	CS 8	27.4	29.3	4.16	62.1	0.12	1.53	1.30	11.70	2.41
	CS 9	27.4	29.5	3.92	58.6	0.08	1.87	1.37	14.06	2.90
	CS 10	27.4	29.5	3.38	50.5	0.11	3.71	0.55	23.20	4.47
	CS 11	26.7	29.0	2.55	37.6	0.20	3.86	21.86	42.43	10.35
	CS 12	26.9	29.5	3.56	52.7	0.16	7.47	4.53	24.14	6.14
	CS 13	27.0	29.3	3.77	55.9	0.13	3.22	17.16	18.89	5.16
	CS 14	26.6	29.4	2.43	35.8	0.25	10.06	59.49	41.05	18.59
OCT.	CS 1	15.3	26.9	3.95	46.6	0.11	6.56	4.64	6.86	1.38
	CS 2	16.4	26.9	3.96	47.7	0.09	6.07	3.99	6.07	1.27
	CS 3	16.1	31.1	3.99	49.0	0.12	6.09	4.03	6.36	1.19
	CS 4	15.1	27.4	3.96	46.7	0.15	6.37	2.14	6.36	0.89
	CS 5	15.9	26.9	4.07	48.6	0.22	6.23	3.11	4.93	0.91
	CS 6	16.3	30.8	3.89	47.9	0.21	7.22	1.87	4.46	0.83
	CS 7	15.7	32.0	4.03	49.4	0.07	6.61	1.71	5.80	1.07
	CS 8	15.2	31.2	3.96	47.8	0.12	7.77	2.61	5.75	1.04
	CS 9	14.5	29.4	3.98	46.8	0.22	9.40	3.11	6.24	1.02
	CS 10	15.7	31.6	3.93	48.1	0.20	6.87	2.61	6.07	0.91
	CS 11	15.7	28.2	4.08	48.8	0.20	6.33	3.26	6.45	0.98
	CS 12	14.8	28.7	3.84	45.2	0.25	7.30	4.34	6.56	1.04
	CS 13	15.3	32.1	3.97	48.3	0.24	5.58	1.75	5.39	1.01
	CS 14	15.6	32.0	4.03	49.3	0.54	11.29	1.68	8.49	1.12