

## 천수만 해역 내 오염퇴적물에 의한 환경피해 개선 방안

윤종주, 신우석

충남연구원 기후변화대응연구센터  
jjyoon@cni.re.kr

이 연구는 대표적인 반폐쇄성 해역인 천수만 내측의 지속적인 오염물질 유입에 따른 퇴적환경 악화에 따른 각종 피해발생 현황을 분석하고, 근본적 해결방안을 제시하여 국비확보를 위한 기초 정책 자료를 지원하는데 목적이 있음

### CONTENTS

1. 목적 및 필요성
2. 천수만 주변의 환경 변화
3. 천수만 해역 오염도에 의한 환경 피해 영향
4. 천수만 해역 오염도 관리방안 (정책 제언)

### 요약

- 이 연구는 도내 대표적인 반폐쇄성 해역인 천수만 내측 일부 지역의 오염퇴적물 침적에 의한 각종 해양생태환경 피해 현황 및 원인 분석을 통한 대응방안 마련을 위해 수행되었음
- 천수만 내 하구역에 건설된 방조제 및 하구호로부터의 방류수(또는 방류 퇴적물) 유출은 방조제와 가까이 접해 있는 연안 환경 및 생태계에 심각한 영향을 미치고 있음
- 연안 환경에 있어서 육상기인 유기물이 미치는 영향을 알아보기 위해서는 간헐적으로 방류되는 방류수와 저층퇴적물에 의한 주변 연안 환경 및 생태계의 영향을 관측 자료를 통해 분석하였음
- 분석 결과, 천수만 내측 해역의 저층퇴적물의 유기물 오염정도는 심각한 상태로 나타났으며, 준설사업 실시 요건 기준을 충족하는 정고로 오염퇴적물이 침적되어 있는 것으로 나타남
- 실제 양식장이 밀집한 간월호, 부남호 방조제 외측해역에서 2013년과 2016년에 여름철 대량 양식어종 폐사의 원인으로 판단되는 빈산소수괴 발생과 오염퇴적물 분포 간의 상관성이 보여 대책 마련이 시급한 것으로 나타남
- 대응방안으로는 긴밀한 오염퇴적도 공간분포 조사를 통하여 정량적인 분포현황을 파악하고, 하구호 내측의 수질오염 저감대책 수립과 함께 국비확보를 통한 해역 내 오염퇴적도에 대한 환경친화적 정화사업의 추진을 체계적으로 진행해야 할 것임



# 01 목적 및 필요성

## 1. 배경 및 필요성

- 충청남도 하구역에 건설된 다양한 방조제 및 하구호로부터의 방류수(또는 방류 퇴적물)에 의해 방조제와 가까이 접해 있는 연안 환경 및 생태계에 악영향을 미치고 있음
  - 특히 여름철 담수호로부터 배수갑문을 통한 대량의 육상기원 유기물(축산, 농사, 생활, 산업 단지 등) 유입으로 인한 오염현상이 문제가 되고 있음
- 천수만 내측해역(간월호, 부남호 주변)으로는 가두리 양식장이 성행하고 있어, 양식장에서 배출되는 양식어의 먹이와 양식어의 분뇨 등에 의한 저질 오염도 일부 영향을 주고 있음
  - 이에 따라 연안 환경에 있어서 육상기원 유기물이 미치는 영향을 알아보기 위해서는 간헐적으로 방류되는 방류수에 의한 주변 연안 환경 및 생태계의 영향을 정기적으로 파악할 필요성이 있음
- 천수만 해역에는 농경지 확보 및 용수확보를 방지하기 위한 시설로서 서산A지구방조제(간월방조제), 서산B지구 방조제(부남호), 홍성방조제, 보령방조제 등이 위치해 있으나 수질이 매우 악화되어 있음
  - 간월호방조제의 경우, 농업용수 공급을 위한 매우 중요한 수자원임에도 불구하고 최종 물막이 이후 수질 농도가 지속적으로 증가추세에 있음
- 방조제 내의 오염된 담수가 대량 방류될 경우, 방조제 주변 해역의 수질이 급격히 악화되어 천수만 내 주요 양식장에 영향을 미칠 가능성이 매우 큼

- 천수만 내 방조제의 경우, 방조제 내측 수질환경기준(COD기준)이 최하위등급인 VI등급(10mg/L)을 초과하고 있어 친환경농산물 인증을 위한 농업용수 기준에 매우 미흡한 수준을 보임
  - 따라서 방조제 내의 오염된 담수가 대량 방류될 경우, 방조제 주변 해역의 수질이 급격히 악화되어 천수만 내 주요 양식장에 영향을 미칠 가능성이 매우 큼
- 따라서 방조제 내의 오염된 담수가 대량 방류될 경우, 방조제 주변 해역의 수질이 급격히 악화되어 천수만 내 주요 양식장에 영향을 미칠 가능성이 매우 큼
  - 이와 함께 육상에서 기원하는 각종 오염부하 퇴적물이 간월호 및 부남호 전면 해역에 지속적으로 침적하여, 저층 퇴적물의 오염정도가 심화되고 있음
    - 이로 인한 여름철 양식장 어류 대량 폐사, 빈산소 수괴 발생 등 각종 해양생태환경 피해가 유발되는 것으로 나타나 대책마련이 시급한 실정임

## 2. 연구의 목적 및 내용

- 천수만 내측 해역에 분포하는 저층 오염퇴적토에 의한 다양한 환경피해현상(양식어장 수산자원피해 등)이 발생 현황 분석
- 국내·외 관련 자료 조사를 통해 천수만 내 오염퇴적토와 빈산소 수괴 발생 메커니즘과의 환경적 상관 영향에 대해 검토
- 반복될 수 있는 천수만 내 각종 환경피해 현안에 대한 근본적인 대책 마련을 위한 정책방향(오염퇴적물 처리 및 관리 방안) 제시

## 3. 연구의 내용

- 본 연구에서는 반폐쇄성 해역인 천수만 내측 해역의 저층 오염퇴적물에 의한 환경피해를 분석하고, 해결방안 및 오염물질 유입 원인 제거를 위한 정책적 대안을 제시하였으며 세부 연구내용은 다음과 같음
  
- 천수만의 개항 및 방조제 건설 후 천수만 주변 환경변화
  - 당해역의 자연환경, 환경의 변화, 어장 여건 분석
  
- 천수만 주변 육상기인 오염원 환경 조사
  - 주요 방조제 현황 및 천수만 내 오염퇴적물 분포특성 분석
  - 기존 조사자료 문헌조사
  
- 빈산소 수괴 발생에 따른 양식장 집단 폐사 원인 조사
  - 오염퇴적물 분포와 빈산소 수괴 발생 간의 상관관계 분석
  - 천수만 내 빈산소 수괴 발생특성
  
- 오염퇴적물 처리 및 관리 방안 제시, 정책 제언
  - 하상퇴적물 공간조사를 통한 오염정화지수 산정 방안 제시
  - 모니터링 결과를 활용한 해역별 관리 방안 분석(준설, 피복 등)

## 02 천수만 주변의 환경 변화

### 1. 천수만의 개황

- 천수만은 충청남도의 서해중부에 위치한 반폐쇄 천해성 내만으로, 행정구역으로는 태안군, 서산시, 홍성군 및 보령시로 둘러싸여 있음(그림 2-1)
- 천수만은 방조제 건설 이전에는 남북으로 약 40 km, 만 중앙부의 최대 폭은 약 10 km로서 총 해역면적은 약 380 km<sup>2</sup> 였음(박, 1976)<sup>1)</sup>
- 천수만의 방조제는 1983년 10월에 사장포 해역(서산A지구), 1985년 3월에 적돌강 해역(서산 B지구)에 건설됨
- 또한, 1999년 충청남도 보령시의 보령방조제, 2000년 충청남도 홍성군의 홍성 방조제 등이 완공되어 천수만의 면적은 약 180 km<sup>2</sup>로 방조제 건설 이전보다 약 절반 감소하였음



[그림 2-1] 충남 도내 유류오염표시 도면

1) 박동원, 원격탐사에 의한 서해안 천수만 간척지 지형 연구, 과학기술처, R-76-72, 83, 1976

## 2. 방조제 건설 후 천수만 주변 환경 변화

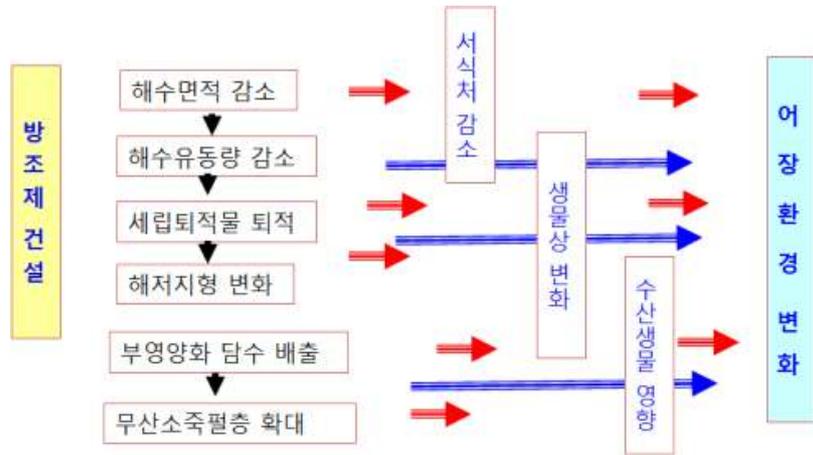
- 방조제 건설 이전 천수만 연안에는 큰 육상오염부하 시설이 없어, 육지로부터 오염물질이 거의 유입되지 않아 청정한 수질이 유지되어 연안어업과 양식을 위한 천혜의 어장이었음
  - 1980년 이전 많은 수산생물의 서식처와 산란장이었으며, 특히, 서해의 가장 중요한 꽃게와 대하 산란장이었음(국립수산진흥원, 1985)<sup>2)</sup>
- 내부의 간석지에서는 굴양식이 성행하였으며, 바지락, 낙지 등이 주로 생산되었고, 농어, 도미류, 민어, 송어 등의 어종들이 생산되었으며(해양연구소, 1978<sup>3)</sup>; 한국전력공사, 1985<sup>4)</sup>), 빠른 조류를 이용한 정치망 어업이 성행하였음
- 그러나 1980년 이후 방조제 및 화력발전소의 건설 등으로 어장면적이 축소되었고 해수 수질이 점차 악화되어 수산물 생산량도 감소되어 가고 있음
- 방조제 건설이전(1986년)의 천수만 지역의 어류 생산량은 12,150톤이었으나 방조제가 완공된 이후인 1991년에는 4,750 톤으로 약 62%가 감소하였음
- 또한, 방조제 건설 완료 후에는 유속이 감소하면서 퇴적상이 변하여 많은 양의 새조개가 번식하였으나, 1990년 중반 이후 새조개 생산량이 크게 감소하였고(한국해양연구원, 2006)<sup>5)</sup> 김양식장도 거의 대부분 면허가 취소되어 생산량도 격감되었음(그림 2-2)

2) 국립수산진흥원, 연근해 주요어종의 생태와 어장, 예문사, 219, 1985

3) 해양연구소, 고정리 화력발전소 건설지점 부근해역에 대한 해양생태학적 기초조사 연구, BSP1 00014-14-3, 138, 1978

4) 한국전력공사, 보령, 삼천포 T/P냉각수가 연안양식 수산물에 미치는 영향조사(II), 한국전력보고서, KRC-84C-J01, 443, 1985

5) 한국해양연구원, 천수만 새조개 어장의 어장환경 및 어업수익성 감정, BSPG40000-1806-3, 185, 2006



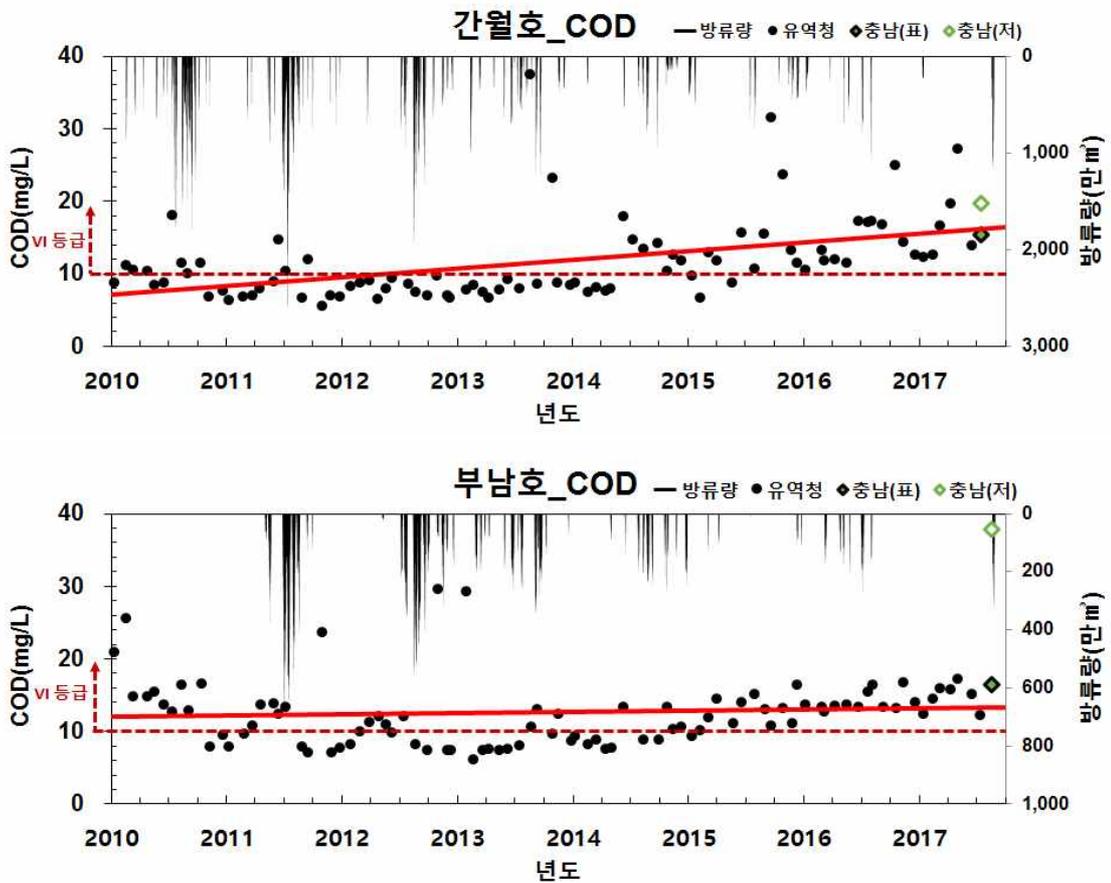
[그림 2-2] 천수만 방조제 건설 후 연안 환경과 어장 환경 변화<sup>6)</sup>

### 3. 천수만 주변 육상기인 오염원 환경

- 충청남도 하구역에 건설된 다양한 방조제 및 저수지로부터 방류된 방류수(또는 방류 퇴적물)에 의해 방조제와 가까이 접해 있는 연안 환경 및 생태계에 악영향을 미치고 있음
  - 특히 여름철 담수호로부터 배수갑문을 통한 대량의 육상기원 유기물(축산, 농사, 생활, 산업단지 등) 유입으로 인한 오염현상이 문제가 되고 있음
  
- 천수만 내측해역(간월호, 부남호 주변)으로는 가두리 양식장이 성행하고 있어, 양식장에서 배출되는 양식어의 먹이와 양식어의 분뇨 등에 의한 저질 오염도 일부 영향을 주고 있음
  - 이에 따라 연안 환경에 있어서 육상기인 유기물이 미치는 영향을 알아보기 위해서는 간헐적으로 방류되는 방류수에 의한 주변 연안 환경 및 생태계의 영향을 정기적으로 파악할 필요성이 있음
  
- 천수만 해역에는 농경지 확보 및 용수확보를 방지하기 위한 시설로서 서산A지구방조제(간월방조제), 서산B지구 방조제(부남호), 홍성방조제, 보령방조제 등이 위치해 있으나 수질이 매우 악화되어 있음.

6) 충청남도, 천수만해역 환경조사 및 어장 이용방안 연구용역 최종보고서, 2011

- 간월호방조제의 경우, 농업용수 공급을 위한 매우 중요한 수자원임에도 불구하고 최종 물막이 이후 수질 농도가 지속적으로 증가추세에 있음
- 환경부 물환경정보시스템 수질 측정망 조사결과(2011~2017년)를 보면(그림 2-3), 2014년말부터 수질환경기준(COD기준) 최하위등급인 VI등급(10mg/L)을 초과하고 있어 친환경농산물 인증을 위한 농업용수 기준에 매우 미흡한 수준을 보임
  - 더불어 COD 수치가 지속적으로 상승하고 있어 수질이 계속 악화되고 있음을 알 수 있음



[그림 2-3] 천수만 내측 서산A,B방조제 내 연도별 수질 변화 추이

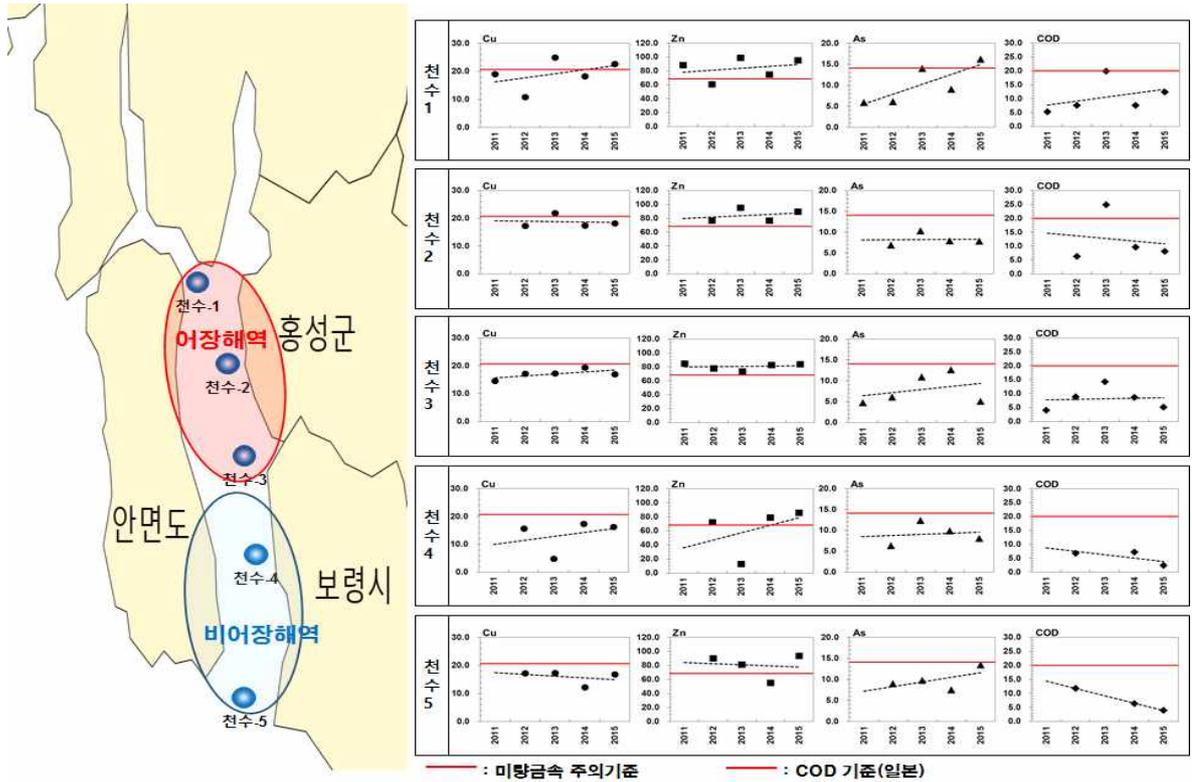
- 또한 2007년 조사 보고된 연구의 간월방조제 내측 하상 퇴적물의 오염 정도를 조사한 결과, 강열감량(IL) 13.6%, 총인(T-P) 604.5mg/kg의 농도 결과를 나타내었음. 이러한 결과는

하천·호소 퇴적물 오염평가 기준(국립환경과학원 예규 제687호)에 나와 있는 기준치(강열감량: 13.0%, 총인: 1,600mg/kg)를 상회하는 수준임

- 따라서 방조제 내의 오염된 담수가 대량 방류될 경우, 방조제 주변 해역의 수질이 급격히 악화되어 천수만 내 주요 양식장에 영향을 미칠 가능성이 매우 큼

#### 4. 천수만 내 오염퇴적물 분포 특성

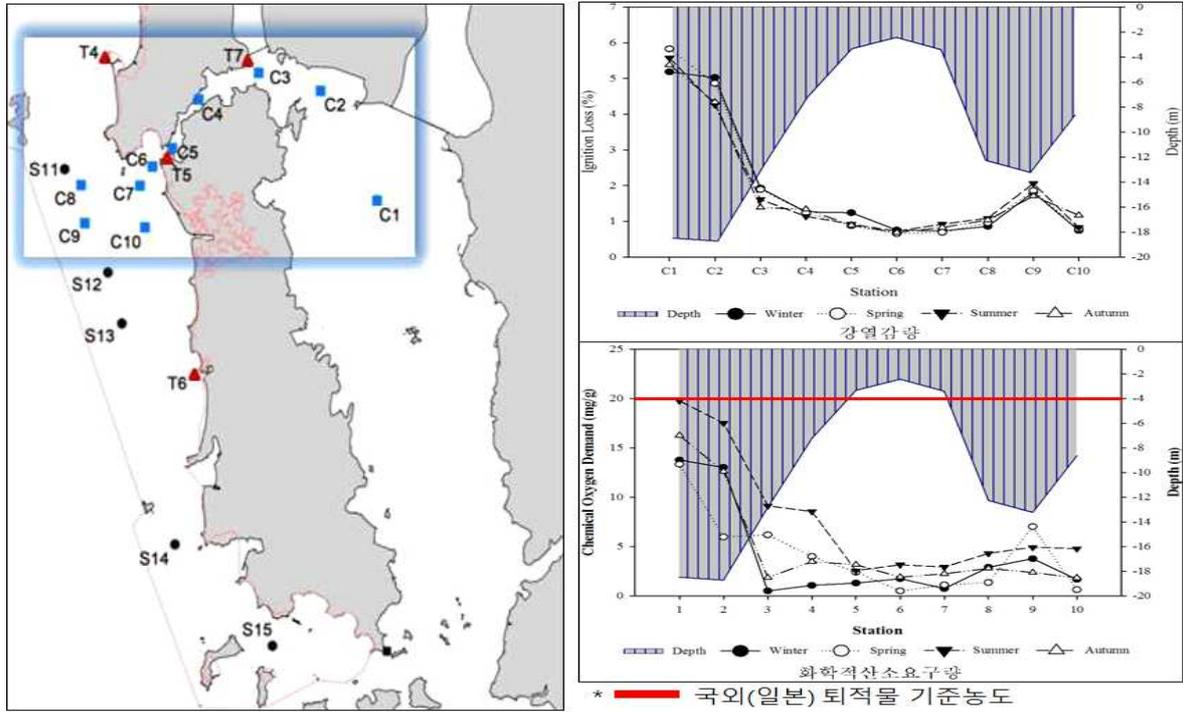
- 천수만은 평균 수심 20m 이내의 반폐쇄적 천해성 내만이며, 총면적은 380km<sup>2</sup>였으나, 방조제 공사가 완공되면서 현재는 약 230km<sup>2</sup>로 감소(1984년 서산지구 방조제 공사로 약 150km<sup>2</sup>가 육지 및 담수호로 됨)
- 간척사업 이후, 해수순환의 약화로 인하여 전반적인 저질분포는 니질 퇴적상으로 변화하고 있음(방조제 건설 이전에는 니사질 퇴적상)
- 2011~2015년까지 천수만 내 저서 퇴적물의 미량금속(Cu, Zn, As) 및 유기물(COD 기준)의 농도 변화 추이를 그림 2-4에 나타내었음
- 미량금속인 경우 시간이 지날수록 전 조사정점에서 농도가 점진적으로 증가 경향을 보이고 있으며, 특히 내측해역인 천수-1, 2지점에서 아연(Zn)은 주의기준을 넘어서고 있으며 구리(Cu)와 비소(As)도 시간 변화에 따라 농도가 증가하고 있음
- 유기물(COD 기준)의 경우는 천수-1지점에서는 농도가 상승하고 있지만 그 외 조사지점에서는 시간변화에 따라 감소 혹은 큰 변화가 없는 특성을 보이고 있음
- 한편 국립공원 연구원에서 조사한 자료를 보면, 천수만 내측(부남호 제방 앞) C1지점이 유기물 오염이 가장 심각하게 나타나고 있으며 C2, C3 순으로 농도는 감소하고 있음.



[그림 2-4] 천수만 저서 퇴적물 오염현황<sup>7)</sup>

- 특히 육상기인 오염원의 직접적인 영향권에 있는 천수만 내측해역의 저서 퇴적물 오염도가 상대적으로 매우 높게 나타나고 있는 것을 주목할 필요가 있음(그림 2-5)
- 계절적으로는 여름의 오염도가 가장 심각하게 나타나고 있음

7) 그림에서 빨간선(기준선) 중 중금속의 기준은 해양환경기준(부록 1 참조)의 주의기준(TEL)을 기준으로 삼았고 유기물(COD)의 기준은 일본 수산생물의 보호를 위하여 생물에 영향을 주는 기준농도로서 20mg/g-dry를 기준으로 삼았음.



[그림 2-5] 천수만 내측 해양퇴적물의 오염원 농도<sup>8)</sup>

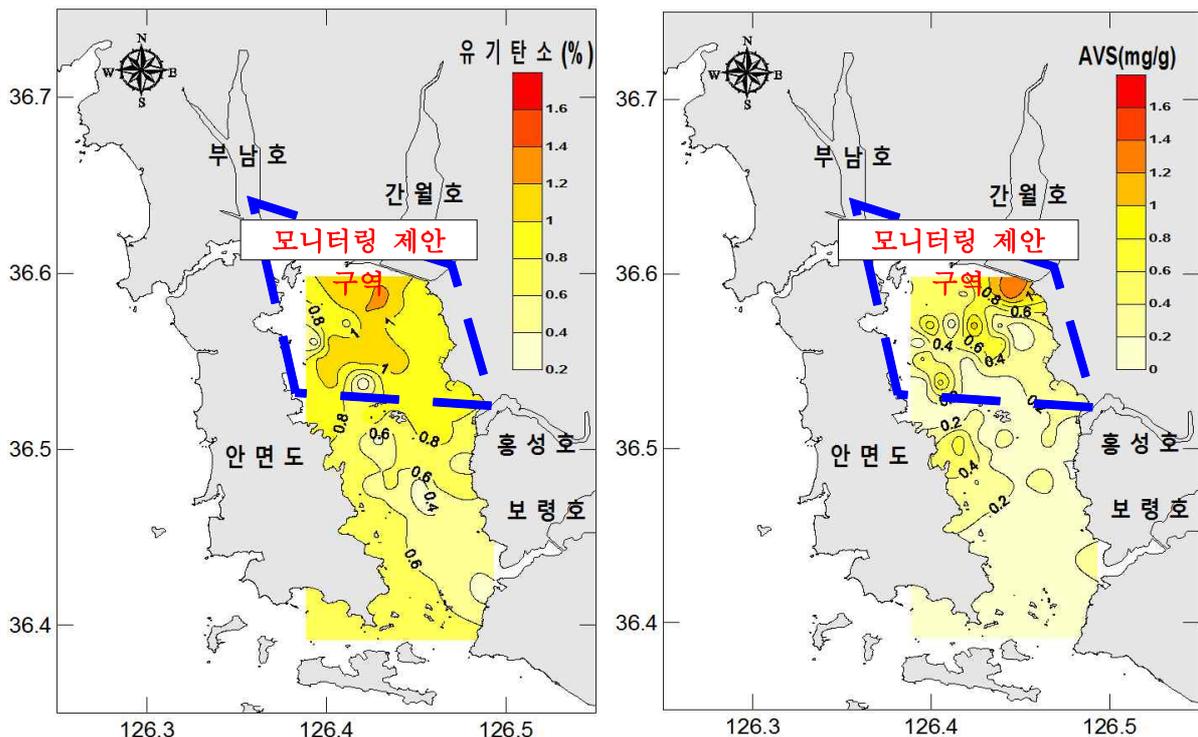
8) 국립공원연구원, 2014 태안해안국립공원 해양환경변화 측정망, 2014

# 03

## 천수만 해역 오염도에 의한 환경피해 영향

### 1. 천수만 내 오염퇴적물 분포 특성(충남 씨그랜트 사업단, 2011)

- 충청남도 씨그랜트 연구사업에 의해 2010년도에 조사된 오염퇴적물(유기탄소 및 AVS) 분포 현황(그림 3-1)을 보면 천수만 외측에서 내측으로 갈수록 오염이 증가하고 있는 것을 알 수 있음

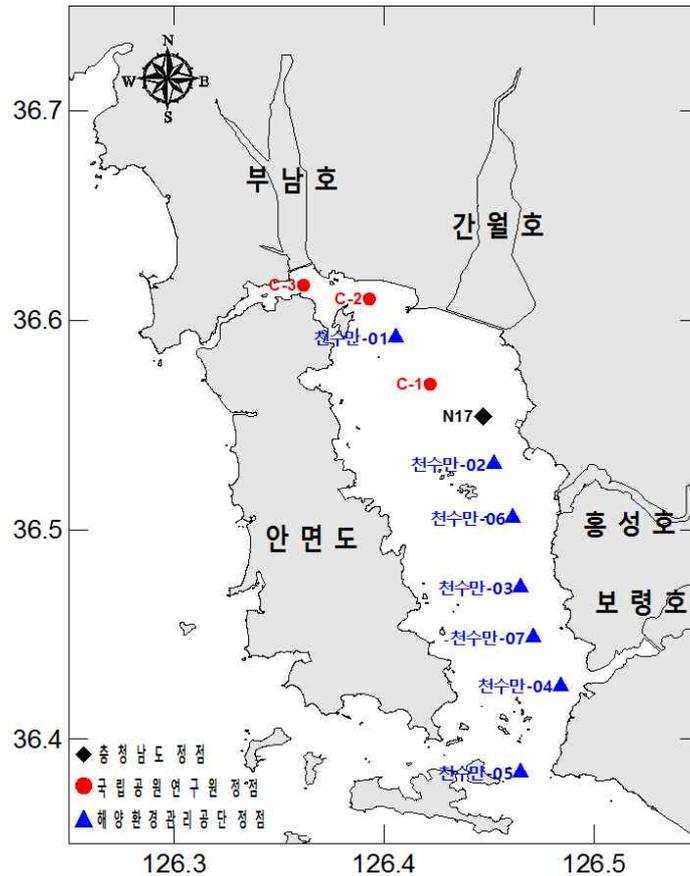


[그림 3-1] 2010년 8월 조사된 표층퇴적물 중 유기탄소(좌) 및 산취발성황화물(우) 농도 분포(충남 씨그랜트사업단, 2011)

- 하지만 간월호, 부남호 등 육상기인 오염부하가 매우 크게 나타나는 주요 하구역과 천수만 내측에 위치한 양식장 주변 지역에 대한 해저 퇴적물 오염 현황 공간 조사가 여전히 부족한 실정임
- 상기의 조사에서는 천수만 전체해역에 대한 유기퇴적물 공간 분포현황(유기탄소 및 AVS)에 대한 기초조사만 수행되었음
- 그림 3-1의 푸른색 점선으로 표시한 바와 같이, 퇴적물 오염정도가 높을 것으로 예상되는 천수만 내측(양식장 부근 및 간월호, 부남호 방조제 부근) 해역에 대한 정밀 조사가 반드시 선행될 필요가 있음
  - 이에 충청남도에서는 ‘2017년 서해안 연안환경측정망 모니터링 연구용역’ 사업에서 천수만 해역 내 오염퇴적도 분포 현황을 상세히 조사·분석하여 결과를 제시할 예정에 있음

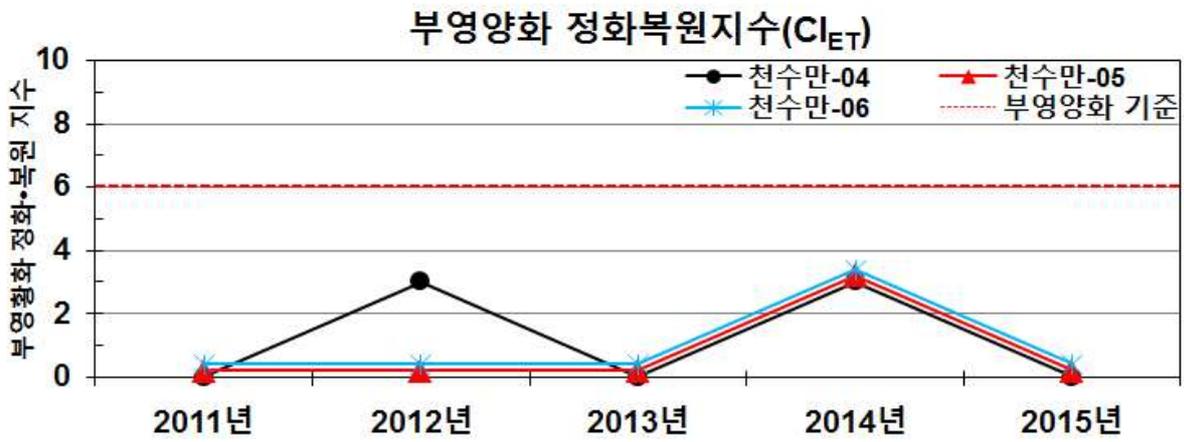
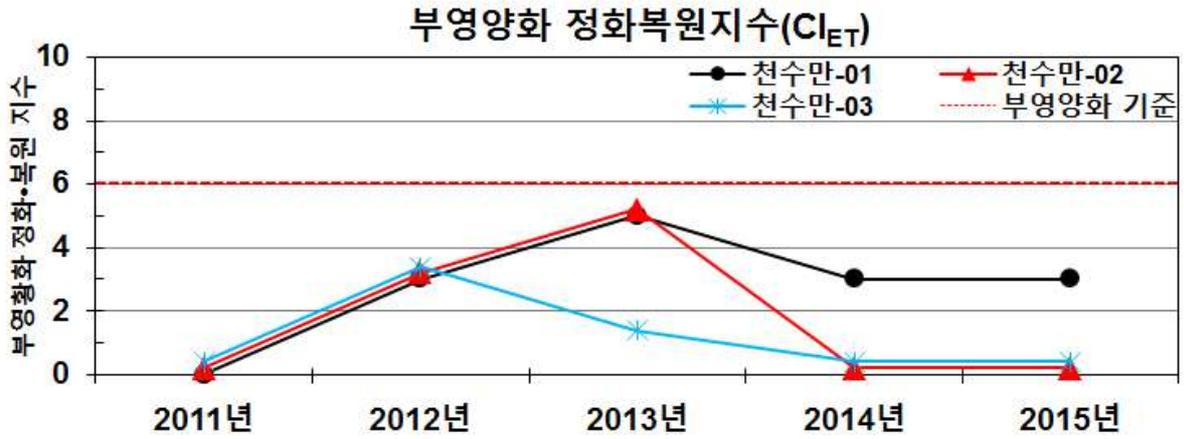
## 2. 천수만 내 오염퇴적물 분포 특성(해양환경관리공단, 충청남도, 국립공원연구원 연구)

- 해양환경관리공단의 국가해양환경측정망 조사자료(2011~2015년, 매년 2월 조사)와 국립공원연구원의 태안해안국립공원 해양환경변화 측정망 조사자료(2014년, 계절별 조사), 충청남도 조사자료(2015년, 계절별 조사)를 참고하여, 강열감량(IL), 화학적산소요구량(COD), 산취발성황화물(AVS) 등의 평가항목으로 한 부영양화 정화복원지수를 산정함(그림 3-2, 3-3)
- 해양수산부에서 고시된 해양오염퇴적물 정화복원 대상구역 설정은 부영양화 정화복원지수가 6이상이거나, 유해화학물질 정화복원지수가 2이상인 경우 설정이 가능함
- 천수만 해역은 공장, 산업단지가 밀집하지 않아 중금속, 지속성 유기오염물질, 선박기인 오염물질 등의 항목의 유해화학물질 정화복원지수는 기준치를 상당히 하회하여, 부영양화 정화복원지수를 중심으로 오염지수를 제시함

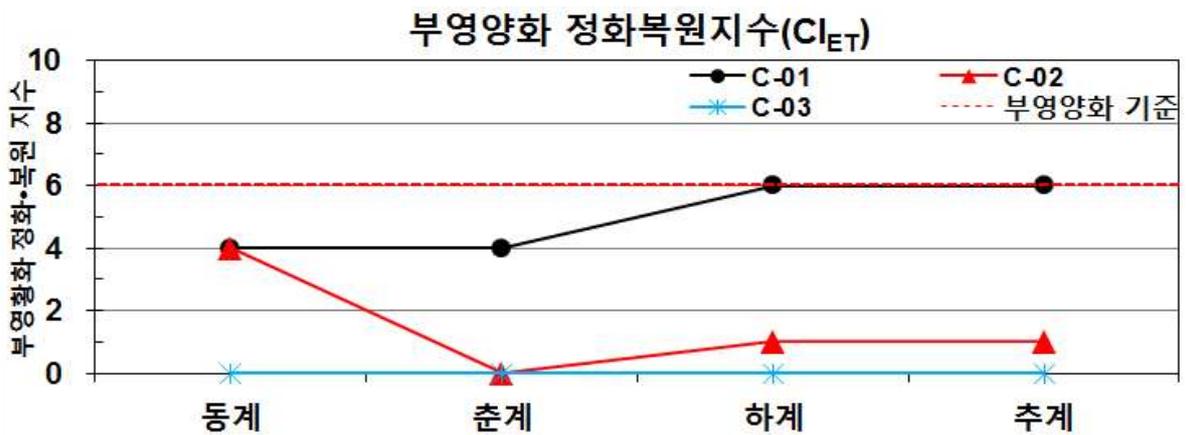


[그림 3-2] 해양환경관리공단, 충청남도 및 국립공원연구원 조사정점

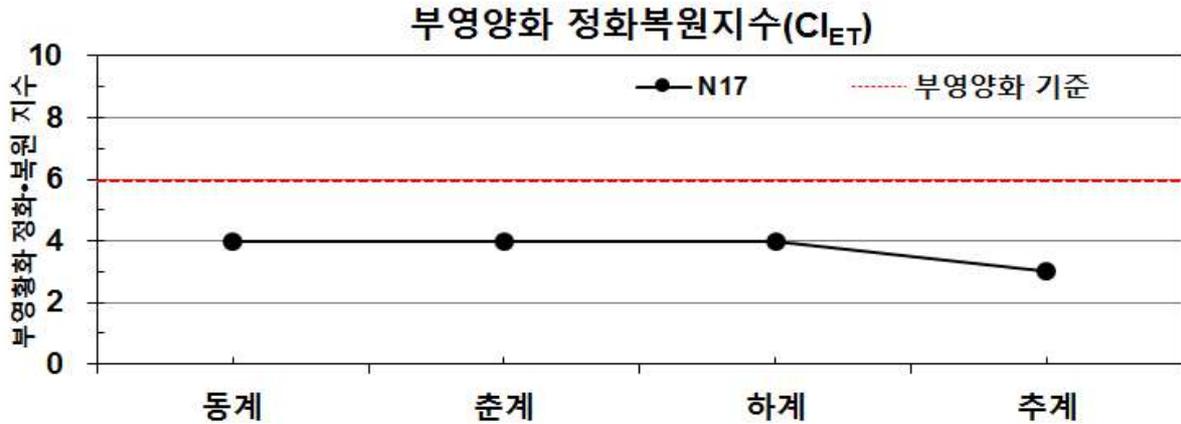
- 국립공원연구원의 2014년 조사결과(계절별 조사)에 따르면, C-1 지점에서 하계와 추계에 부영양화 정화복원지수가 6, 동계와 춘계에 4로 나타나 정화복원 대상구역 조건을 충족하는 것으로 분석되고 있음(그림 3-4)
- 한편 해양환경관리공단의 조사 결과를 살펴보면 천수만-01, 02 정점을 중심으로 부영양화 정화복원 지수가 높게 나타났는데, 특히 2013년도에 두 정점에서 각각 5를 기록하여 해양퇴적물 정화복원 기준치에 근접하는 오염지수가 관측되었음(그림 3-3)
- 충청남도 조사정점인 N17에서의 2016년 계절별 퇴적물 조사자료를 분석한 부영양화 정화지수를 살펴보면, 계절별로 4점까지 나타나고 있어 N17 북측 해역을 중심으로 더 높은 정화복원 지수가 나타날 것으로 예상됨(그림 3-5)
- 따라서 그림 2의 천수만-01, 02 정점, C-1 정점 주변 해역을 중심으로 한 정밀한 해양퇴적물 오염도 조사가 추가로 필요할 것으로 판단됨



[그림 3-3] 해양환경관리공단 조사결과를 이용한 부영양화 정화복원지수 산정치



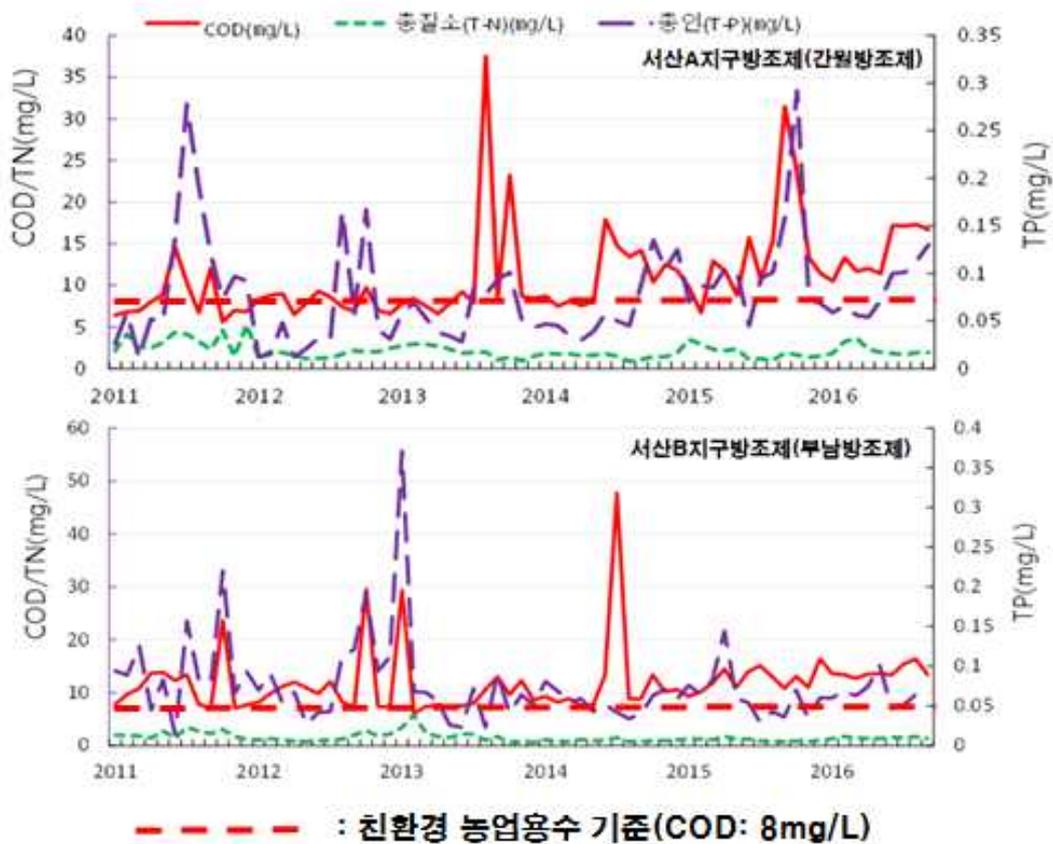
[그림 3-4] 국립공원관리공단 조사결과를 이용한 부영양화 정화복원지수 산정치



[그림 3-5] 충청남도 조사결과(2016년)를 이용한 부영양화 정화복원지수 산정치

### 3. 천수만 주변 주요 환경부하 특성

- 천수만 해역에는 농경지 및 용수 확보를 위한 시설로서 서산A지구방조제(간월방조제), 서산B지구 방조제(부남방조제), 홍성방조제, 보령방조제 등이 위치해 있으나 내측 수질이 매우 악화되어 있음(그림 3-6)
  - 친환경농산물 인증을 위한 농업용수 기준(IV등급, COD 기준 8mg/L 이하, TOC 기준 10mg/L 이하)을 초과하고 있음
- 특히 하계에 담수호로부터 방조제 배수갑문을 통해 대량의 육상기원 유기물(축산, 농업, 생활하수 등) 유입으로 인한 해양오염 발생이 문제가 되고 있음
- 천수만 해역은 부영양화물질에 대한 영향이 크고, 유해화학물질에 의한 퇴적물 오염영향이 상대적으로 적은 특징이 나타남. 이는 산업단지 등을 통한 중금속류나 잔류성 유기오염물질 유입영향이 크지 않음을 보여줌
- 천수만 내측해역(간월호, 부남호 주변)으로는 가두리 양식장이 성행하고 있어, 양식장에서 배출되는 양식어의 먹이와 양식어의 분뇨 등에 의한 저질 부영양화 오염에 일부 영향을 주고 있음



[그림 3-6] 천수만 내측 서산A,B방조제 내 연도별 수질 변화 추이<sup>9)</sup>

#### 4. 천수만 내 양식장 집단 폐사 발생

- 충남도내 양식장 현황(2016년 기준)으로는 총 153개소, 면적 141,348㎡이며, 이 중 태안군(17개소, 103,925㎡), 보령시(39개소, 12,266㎡), 서산시(30개소, 13,115㎡) 순으로 천수만, 가로림만 일대에 양식장이 90% 이상 밀집되어 있음(표 3-1)
- 특히 여름철 고수온 현상 지속에 따른 가두리 양식장의 양식어 폐사는 큰 문제로 부각되고 있음(그림 3-7)

9) 물환경정보시스템(<http://water.nier.go.kr/>)

[표 3-1] 충청남도·시·군 어가 및 사육수 면적 현황

행정 구역	2012		2013		2014		2015		2016	
	양식 어가	사육수 면적								
	개소	m <sup>2</sup>								
충남	213	142,448	193	114,088	171	90,253	161	93,053	153	141,348
보령	79	13,969	72	27,522	67	25,300	53	22,326	39	12,266
서산	44	28,863	36	14,750	32	11,932	33	15,944	30	13,115
당진	15	7,808	13	6,400	13	3,456	11	3,584	17	4,778
서천	2	30,850	2	-	-	-	-	-	-	-
홍성	3	948	3	3,600	3	1,368	3	3,472	3	7,264
태안	70	60,010	67	61,816	56	48,197	61	47,727	64	103,925

자료 : 국가통계포털(<http://kosis.kr>)

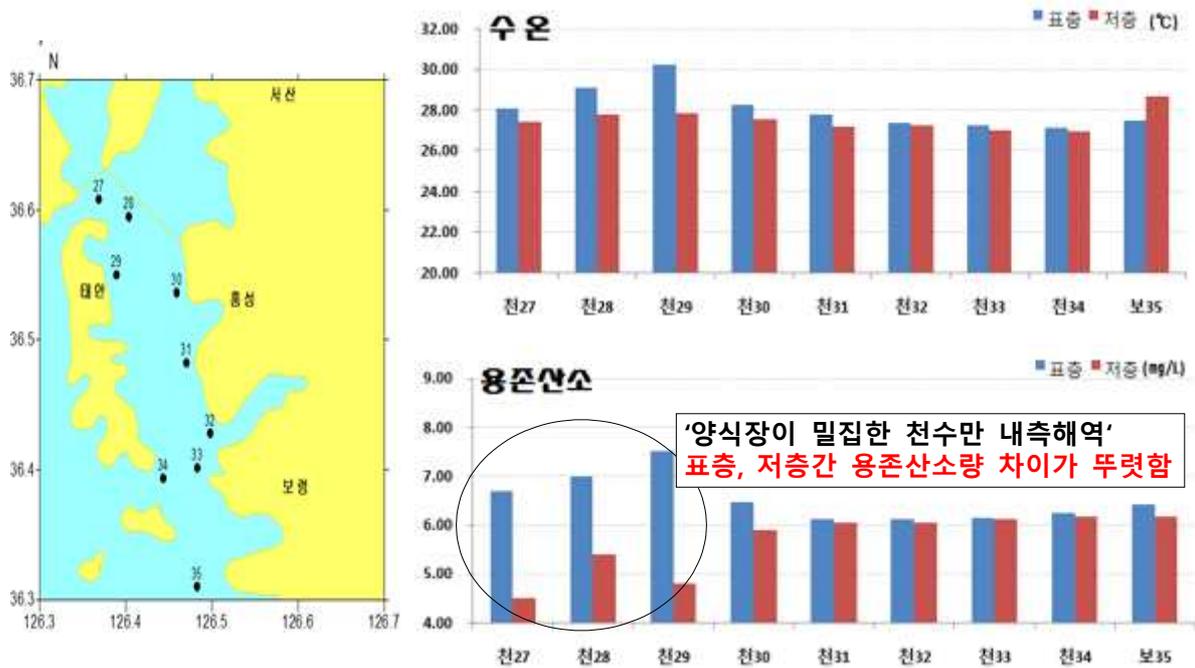
- 2016년 여름은 극심한 폭염이 지속되었는데, 국립수산물과학원에서 운영하는 실시간 어장정보에 따르면 8월 천수만 일대(보령 효자도) 표층 수온은 평균 27.2℃, 최대 29.6℃(8월 13일)으로 8월 10일부터 8일간 28℃ 이상의 고수온이 지속되었음(그림 3-8)
- 이러한 고수온 영향으로 서산시는 13곳(0.75ha)의 양식 어가에서 조피볼락 128만 마리가 폐사하여 약 18.4억원의 피해가 발생하였고, 태안군은 45곳(18.6ha) 어가에서 조피볼락과 송어 등 양식어류 190만 마리가 폐사해 약 26.9억원의 재산피해를 입음<sup>10)</sup>(그림 3-7)
- 천수만 내측은 조피볼락 양식 적지였으나 최근 여름철 고수온 현상으로 대량폐사가 반복적으로 발생하고 있음('13년 500톤, '16년 700톤 폐사)
- 국립수산물과학원 서해수산연구소에서 실시한 폐사원인 조사에서는 7월 말부터 지속적인 해수온도 상승으로 인한 어체 면역기능과 활성 저하에 의한 원인으로 판단된다고 발표함(아시아뉴스통신, 2016.9.13.)

10) 충청남도, “천수만 고수온 피해어가 복구 현황” 내부자료 인용, 2016. 11. 1

- 빈산소 수괴 발생은 고수온이 지속됨에 따라 저층의 산소 공급 부족과 함께 저층 퇴적물의 유기물 분해에 의한 산소 소비 등이 복합된 원인으로 발생하게 됨
  - 따라서 고수온 지속과 빈산소 수괴 발생, 저층 오염퇴적토 간에는 서로 깊은 상관 관계가 있어, 원인규명 및 대처 방안 수립이 절실히 필요함



[그림 3-7] 서해안 천수만 내 양식어 집단 폐사 사진<sup>11)</sup>

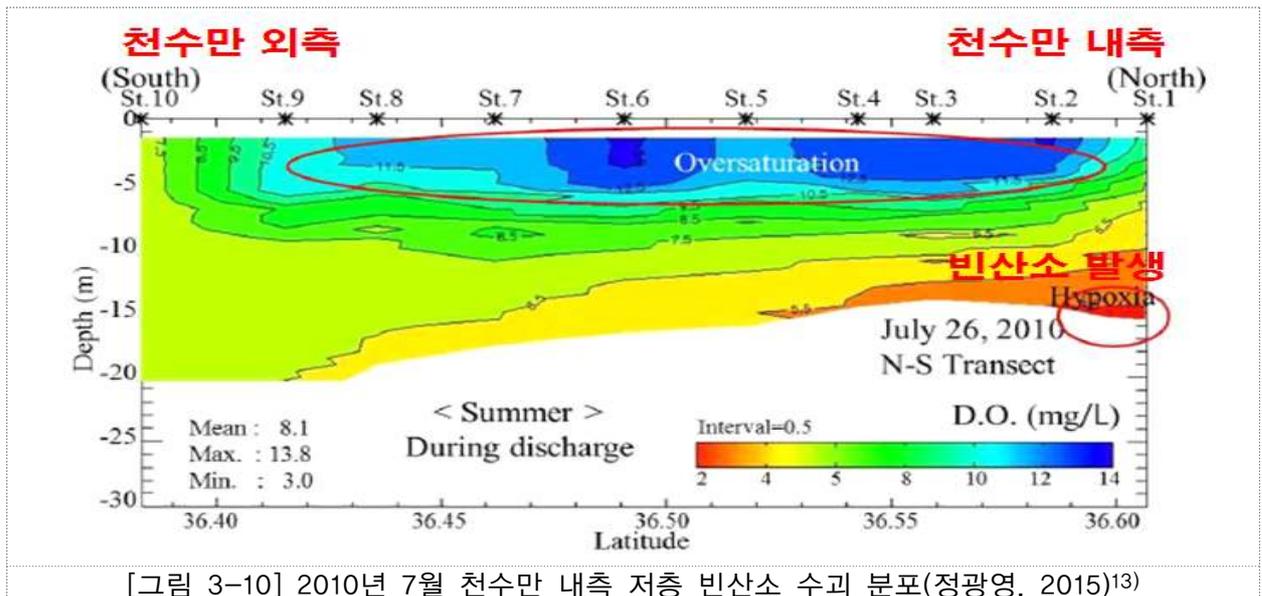
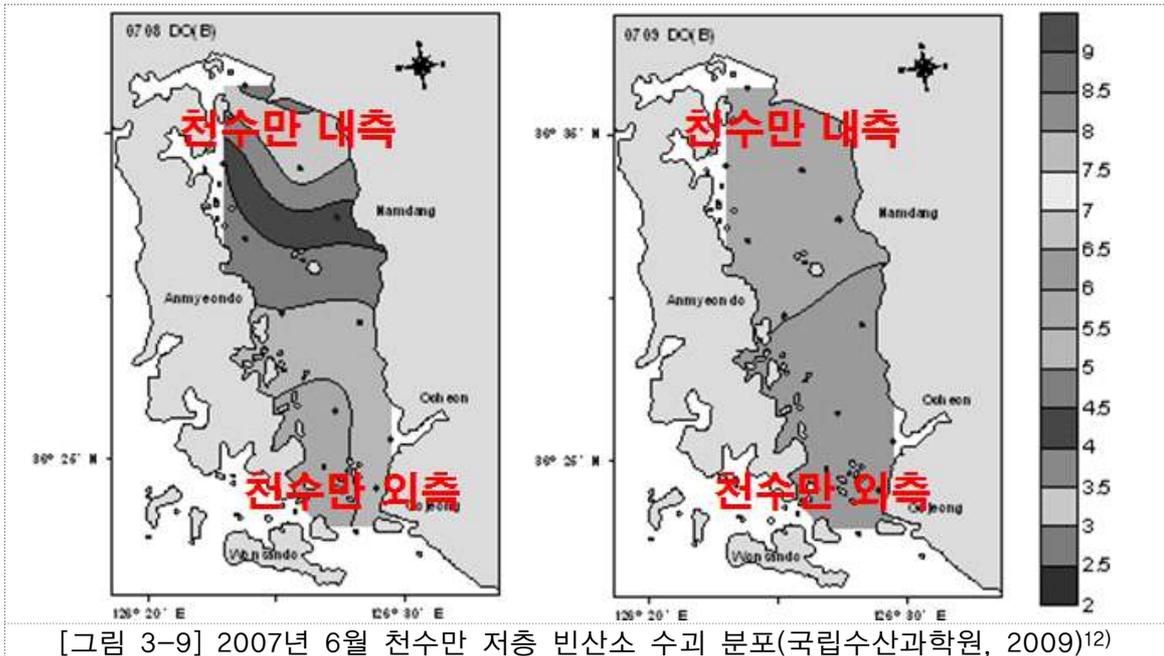


[그림 3-8] 2016년 8월 천수만 조사정점의 수온과 용존산소(서해수산연구소, 2016)

11) (좌)중앙일보 보도자료(2016.8.16.), (우)조선일보 보도자료(2016.8.19.)

## 5. 충청남도 천수만 내 빈산소 수괴 발생 특성

- 2007년에 조사된 연구를 보면 여름철 7월부터 용존산소의 농도가 낮아지기 시작하여 8월에 천수만 내측 방조제 부근에서 2.5~3.0mg/L의 낮은 농도 분포를 보임(그림 3-9)



12) 국립수산과학원, 한국 연안의 빈산소 수괴, 2009

13) 정광영, 천수만의 여름철 해수유동과 물성 및 용존산소 변동 특성, 충남대학교 박사논문, 2015

**빈산소 수괴란** : 부영양화 된 내만에서 수괴의 성층화와 유기물 분해 및 기타 화학적 요인들에 의해 용존산소(DO)의 농도가 2.5~3.0mg/L 이하로 낮아지는 현상(이 동, 2010)<sup>14</sup>. 보통 하계 고수온기에 표층의 수온은 높고, 저층 수온이 낮아 수괴가 연직으로 성층될 때 발생함

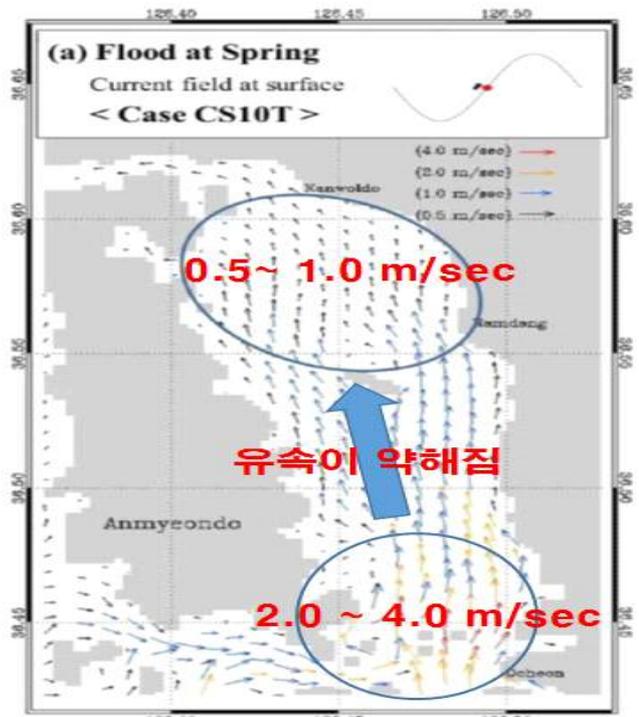
▶ 용존산소(dissolved oxygen) 농도가 0.025mg/L이하로 감소할 경우 저서동물은 완전히 폐사하여 일종의 무생물대(azoic zone)가 형성됨(Lim et al., 2006)<sup>15</sup>

● 여러 연구 결과를 토대로 천수만은 양식장이 많이 분포하고 있는 내측 저층에서 빈산소 수괴가 발생하고 있음을 알 수 있음(그림 3-10)

● 천수만의 해류(조류)의 분포 특성에 관한 기존 연구 결과를 보면 천수만 외측에서 내측으로 갈수록 해조류의 속도가 감소하는 것을 알 수 있음(그림 3-11)

- 이러한 천수만 내측의 해수순환 약화에 따라 육상으로부터 유입된 오염물질이 외부로 이동보다는 저층에 퇴적될 가능성이 높음

● 천수만 내측과 외측의 저질 퇴적물 오염특성을 비교해 보면, 천수만 내측의 어장해역(가두리 양식장) 부근이 외측 해역(비양식장 부근)보다 유기물 및 중금속 농도가 높게 조사되었음



[그림 3-11] 천수만 내·외측 대조기 유속 분포(정광영, 2015)

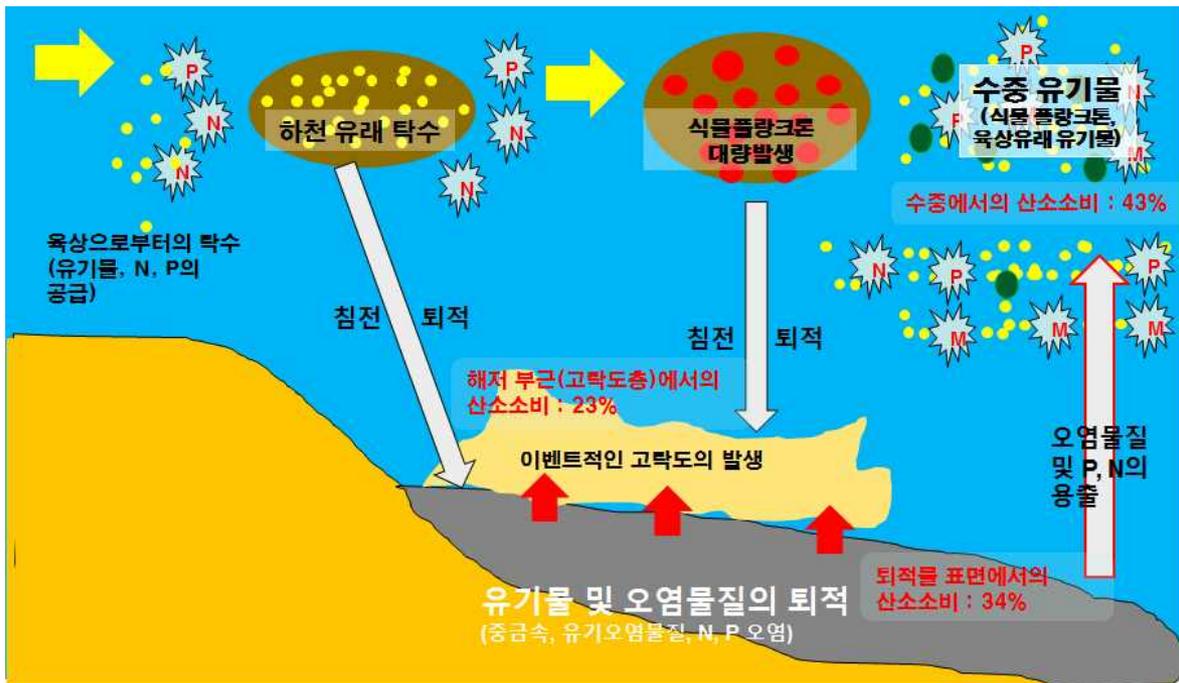
● 이는 양식어장 자체가 저층 퇴적환경에 있어서 하나의 오염원인자로 작용하고 있음을 나타내고 있음

14) 이용화 등, 빈산소 수괴해역 용존산소 환경개선장치 개발과 현장 적용, 해양환경안전학회지, 16, 339-344, 2010

15) Lim et al., Hypoxia and benthic community recovery in Korean coastal waters, Mar. Pollut. Bull., 52, 1517-1526, 2006

## 6. 빈산소 수괴 발생 원인들(오염퇴적물과 관련해서)

- 해양 저질 퇴적물이 니질화된 (반)폐쇄성 유역에 있어서 주요한 환경문제 원인의 한가지인 빈산소 수괴의 발생 메커니즘을 그림 3-12에 나타냄



[그림 3-12] 폐쇄성이 강한 해역에 있어서 빈산소의 발생요인의 개념도<sup>16)</sup>

자료: 일본 카이다 만(海田灣)에 있어서 조사결과로부터 얻어진 반폐쇄성 유역의 빈산소 발생 메커니즘 요약

- 빈산소의 발생요인은 첫 번째, 수중에서 발생한 식물플랑크톤이 저질에 퇴적하는 과정에서 유기물 분해에 따른 산소의 소비(43%), 두 번째로 저질의 퇴적물이 해류(조류)에 의해 재부유시 고탁도층 내에서의 유기물 분해에 따른 산소소비(23%), 마지막으로 저질 퇴적물 표면에서의 유기물 분해에 따른 산소소비(34%) 등으로 나타남
  - 여기서 저질 퇴적물에 의한 산소소비가 전체 소비량의 약 57%정도를 점하고 있음을 주목해야 함
  - 이벤트적인 고탁도층 및 저질 퇴적물 표면에서의 산소소비가 전체 산소소비량의 반 이상을 점하고 있기 때문에, 빈산소의 발생을 제어하기 위해서는 유기오염물질을 함유한 오염 퇴적 환경에 대한 개선이 가장 중요하다고 할 수 있음

16) 国土交通省中国地方整備局, 石炭灰造粒物による底質改善手法の手引き, 2012

# 04

## 천수만 해역 오염토 관리방안(정책 제언)

### 1. 오염퇴적물 분포 현황 정밀조사 실시

- 빈산소 수괴 현상은 주로 수괴(물 덩어리)의 혼합이 자유롭지 못한 내만이나 폐쇄된 장소에서 발생하는 것으로 알려져 있지만, 큰 강이 유입되는 하구역에서도 발생하여 연안 생태계에 큰 피해를 미치는 경우도 있음
- 전 세계적으로 1940년대 후반부에 공업적으로 생산된 질소비료 사용량이 증가한 후 10년 뒤부터 관찰되기 시작하였음
  - 국외에서는 1950년대에 아드리아해 북부해역(Northern Adriatic Sea)에서 처음으로 보고 되었으며, 1940년대와 1960년대 사이에는 흑해(Black Sea)의 북서부 대륙붕에서도 발견 되었음
  - 국내 연안역의 경우, 다양한 형태의 연안개발과 이용으로 인한 내만해역의 수질 및 퇴적물 오염의 가속화가 진행 중이며, 특히, 반폐쇄성 내만의 경우, 수괴 내 빈산소(또는 무산소)층의 형성으로 인한 저서환경 및 생태계의 훼손이 극심한 상황에 놓여 있음
  - 국내에서는 1970년대 중반부터 진해만에서 발견되었으며(Kweon, 1979)<sup>17)</sup>, 매년 여름철이면 지속적으로 형성되고 있으며(Lim et al., 2006), 가막만, 천수만, 시화호, 영산강 하구 등과 같은 연안역의 다양한 지역에서 빈산소 수괴가 형성되고 있음(그림 4-1)

17) S. W. Kweon, Studies on the distribution of dissolved oxygen on Jinhae Bay in Summer. Bull. Nat' l. Fish. Res., 22, 7-20, 1979

- 그림 4-1에 제시된 바와 같이 빈산소 수괴에 따른 수요 수산자원 피해발생 해역은 해양오염퇴적물에 대한 정밀조사가 진행되어 국가차원의 대책이 수립되고 있으나, 충남도내 천수만 해역만이 조사지역에서 제외되어 있어 신속한 조치가 필요함

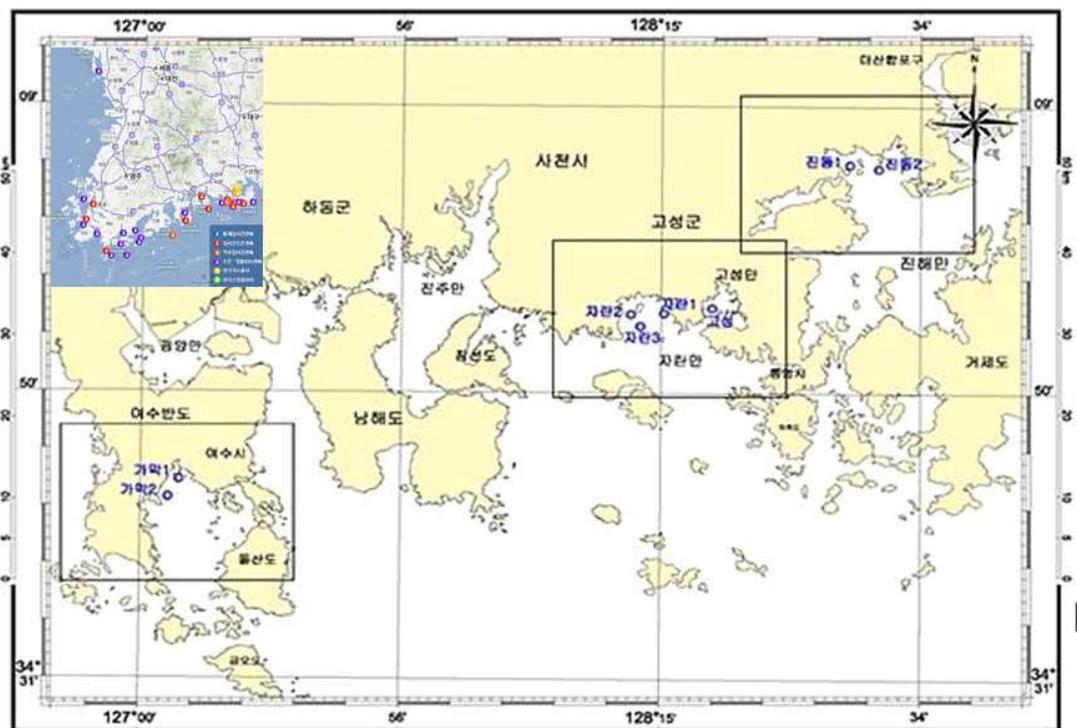


●: 해양오염퇴적물 조사대상 해역 위치도  
 ●: 빈산소 수괴 현상 발생 대표 해역 위치도

[그림 4-1] 우리나라 연안 빈산소수괴 및 오염퇴적물 조사 해역 위치도

- 국토해양부에서는 2010년~2012년까지 전국 27개 해역을 대상으로 실시한 해양오염퇴적물 분포 현황 조사결과, 22개 해역에서 정화복원이 필요할 정도로 오염된 퇴적물을 발견하였음
  - 처리 대상물량은 최소 8백만 $m^3$ (단가: 105천원/ $m^3$ )이상으로 최소 8천4백억원~1조원이상 해양오염퇴적물 정화복원 비용이 필요한 것으로 나타남

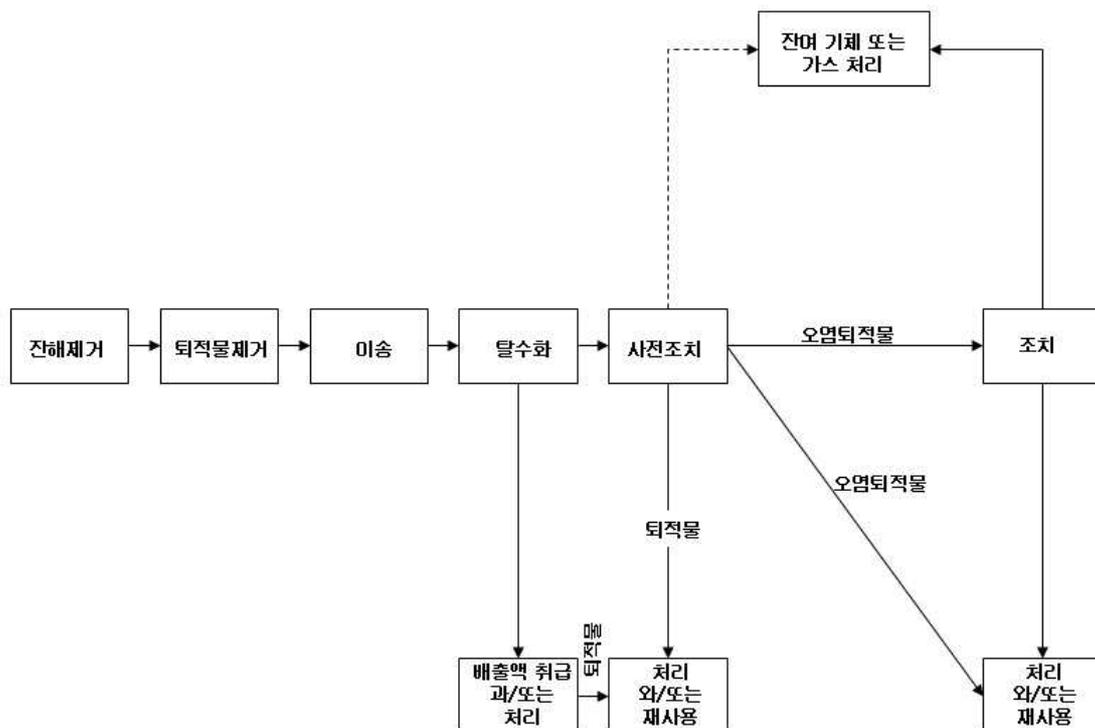
- 이처럼 빈산소 수괴 발생과 저질 오염퇴적물간의 높은 상관성은 이미 많은 연구에서 언급하고 있음. 따라서, 국내·외적으로 연안 내만의 빈산소(또는 무산소)층의 해소를 위한 오염 저질 퇴적환경의 개선을 통한 생태계 복원 사업이 꾸준히 진행되고 있음
- 현재 우리나라의 남해(진해만, 여수만, 자란만) 지역에서는 빈산소 수괴의 발생 예측 자료를 신속하게 제공하기 위해 주요 양식장에 실시간 관측시스템을 실시하고 있음(그림 4-2)
- 충청남도 천수만 해역에도 이러한 실시간 관측시스템이 반드시 추가되어야 함
  - 기후변화에 의한 지구온난화 현상 가속화에 따른 우리나라 연안의 빈산소 수괴 발생 해역은 더욱 확대될 가능성이 높음
  - 이에 따른 부정적 영향(해양생태계의 파괴 및 그로 인한 어업피해 등)도 증대될 가능성이 크기 때문에, 빈산소 수괴 발생 해소를 위한 기술 개발 및 저층 오염퇴적물의 처리는 은 현시점에서 천수만내에 매우 시급한 과제임



[그림 4-2] 빈산소 수괴 실시간 관측시스템 설치 현황(국립수산과학원)

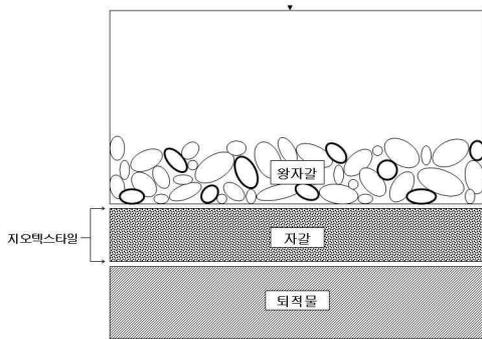
## 2. 준설을 통한 오염퇴적물 처리

- 준설(Dredging)은 많은 오염퇴적물을 공간적으로 처리할 수 있는 방법으로, 오염퇴적물을 근본적으로 수저에서 제거한다는 점에서 가장 기본적인 처리방법이라 할 수 있음
- 그러나 수로유지, 레저시설의 수심유지 등과 같은 일반퇴적물의 준설과는 달리 최근 주요 논의되고 있는 환경준설(Environmental Dredging) 방안을 적극 검토해야함
  - 즉, 오염퇴적물의 준설에 있어 오염퇴적물의 재부유와 수반된 오염물질 누출의 최소화 및 준설토의 친환경적 처리가 더욱 요구되고 있음(그림 14)
- 특히 천수만 내측해역은 양식장이 밀집하고, 수산자원보호구역으로서의 어로행위가 빈번한 곳이어서 준설 실시에 따른 어장환경피해에 대한 민원이 가장 큰 걸림돌이 될 것임

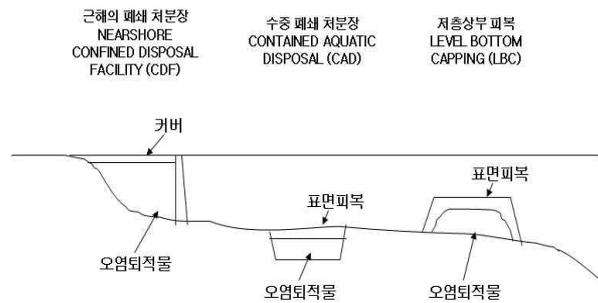


[그림 4-3] 준설과정의 일반적인 처리과정<sup>18)</sup>

- 이외의 현장피복방법(In-Situ Capping)은 자연정화가 불가능한 경우에 선택할 수 있는 처리공법으로, 오염퇴적물을 제거하지 않고 현장에서 직접 처리하는 방법(고정화/안정화/표면피복, 주위와 차단 또는 봉입)을 말함



[그림 4-4] 표면피복방법 디자인 사례<sup>19)</sup>



[그림 4-5] 표면피복방법의 대표적인 사례<sup>20)</sup>

### 3. 기타 오염퇴적물 처리 방안(굴 패각 활용 중심으로)

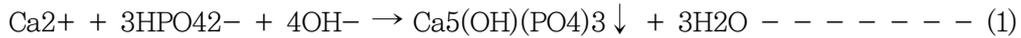
- 굴 패각을 이용한 하상 오염 퇴적물 개선 메커니즘으로서는 먼저, 화학적인 작용을 통해 황화수소, 영양염류, 유기물 및 유해 미량금속(중금속 등)의 용출 발생 및 산소 소비의 제어에 의한 환경 개선에 따른 저서 생물의 증가를 예상할 수 있음(그림 4-6)
- 이러한 오염퇴적물 개선 방법은 오염퇴적물이 발생할 가능성이 있는 삼교호 등과 같은 호소 및 유속이 감소하는 하천 하류, 폐수의 유출이 빈번한 산업용수 배수지 등에도 활용 가능함. 게다가 이 정화방법은 경제적인 상용화 기술로 비용대비 수환경(생태계)의 복원 효과를 최대화할 수 있음

18) US Environmental Protection Agency. 1994, Assessment and Remediation of Contaminated Sediments(ARCS) Program REMEDIATION GUIDANCE

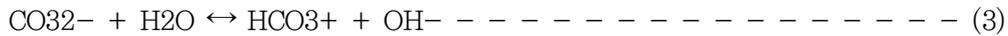
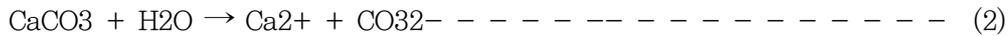
19) US Environmental Protection Agency. 1994, Assessment and Remediation of Contaminated Sediments(ARCS) Program REMEDIATION GUIDANCE

20) U.S. Army Corps of Engineering. 1998. Guidance for Subaqueous Dredged Material Capping

- 칼슘성분(CaO)은 인산염과 반응하여 난용성의 수산화아파타이트(hydroxy apatite)를 형성하며 이러한 칼슘성분은 굴패각에 많이 포함되어 있음. 따라서 굴 패각에 의한 인(P) 등의 흡착에 의한 퇴적층으로부터 해수 중으로의 인의 용출 제어를 할 수 있음



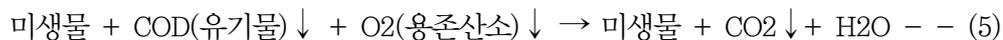
- 굴패각 입자는 물속에서 (2)식과 같이 주성분인 CaCO<sub>3</sub>가 용해되어 Ca<sup>2+</sup>와 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>이온이 생성되고, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>는 물과 반응하여 다시 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>와 OH<sup>-</sup>를 생성하며, 이때 생성되는 OH<sup>-</sup>로 인하여 용액의 pH가 상승하게 됨



M : 중금속

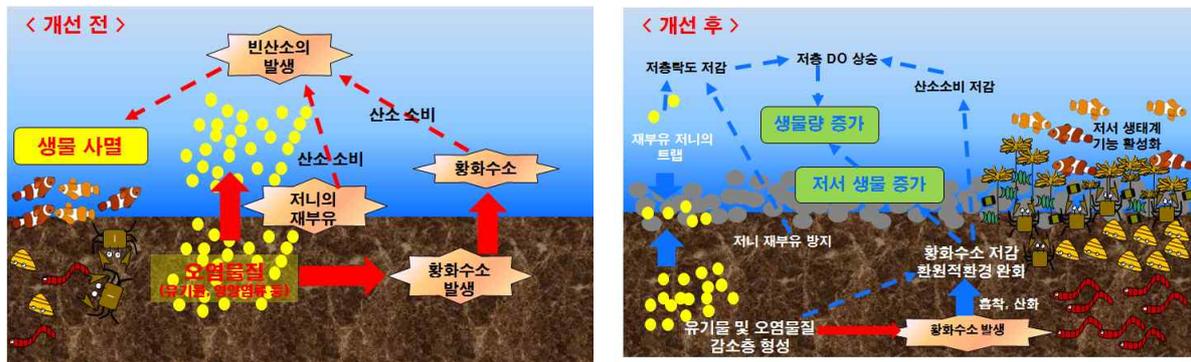
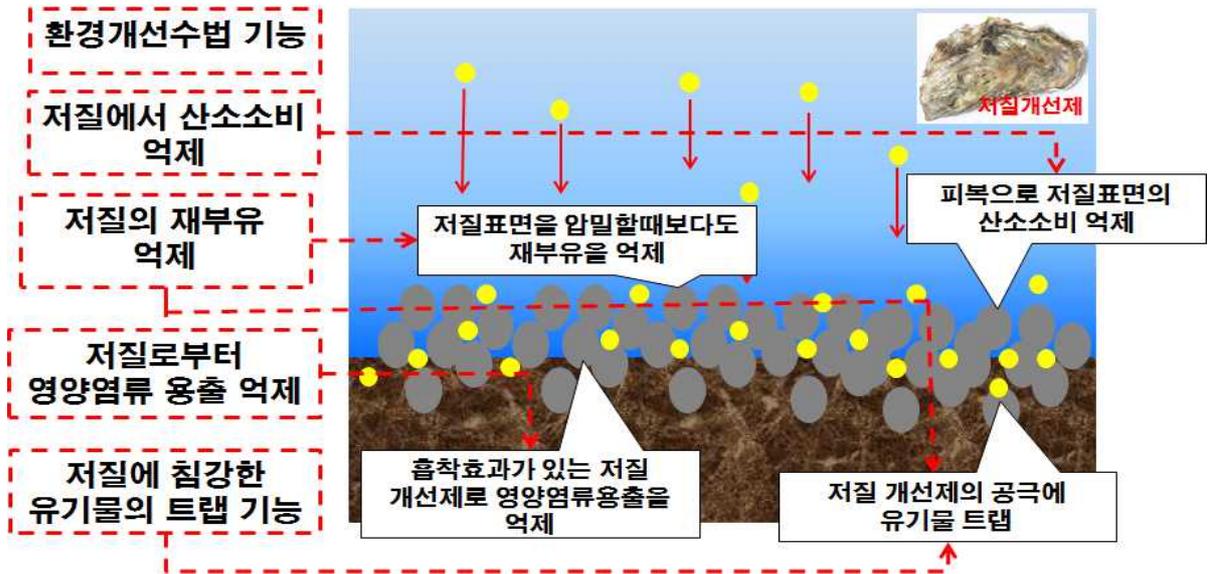
- (4)식과 같이 수산화기(OH<sup>-</sup>)는 중금속과 결합하여 중금속 수화물(M(OH)<sub>n</sub>)을 형성하여 안정화/고정화 할 수 있음

- 한편 물리적인 작용으로 하상 퇴적물 내 유기물의 포집에 의해 수중으로 유기물 이동이 차단되므로 유기물 분해 활동이 저하되어 수중의 용존산소(DO) 소비 또한 줄어듦



※ 유기물 재부유 양이 줄어들어 결과적으로 미생물이 분해에 이용하는 용존산소 양도 줄어듦

- 굴 패각 등에 미세조류(규조류 등)의 부착 등에 의한 생물의 증가도 기대 가능



[그림 4-6] 버려지는 굴 패각을 활용한 저질 오염퇴적물 개선 개념도

#### 4. 정책 제언

- 천수만 내 수온과 빈산소 수괴 발생 예측 가능한 관측 시스템의 설치·운영을 통하여 최초발생시기, 발생지점, 형성 수심 등에 대한 예측 자료와 더불어 발생상황을 어업인에게 제공할 수 있는 시스템의 마련이 필요
- 또한 연구 사업 추진을 통해 빈산소 수괴 발생에 영향을 주고 있는 저질 오염퇴적물을 개선할 수 있는 방안을 모색하고 이를 실천함으로써 빈산소 수괴 발생을 제어할 수 있어야 함

- 현재 충청남도에서는 ‘서해안 연안환경측정망 모니터링 연구’ 사업을 통하여 2015년부터 주요 연안에서의 해양환경 관측을 정기적으로 수행하고 있음
  - 이를 통한 이상 현상 발생시 집중 모니터링 등을 추진할 수 있도록 모니터링 과제를 지원하여, 천수만의 이상 현상(고수온 및 빈산소 발생 등)에 대한 원인 규명 등 대응책을 마련할 필요가 있음
  
- 2010년도에 진행된 충청남도 씨그래نت 연구사업에서 제시된 관측결과(그림 3-1)를 참조하면, 천수만 내측 간월호, 부남호 전면해역에 대한 퇴적물 오염도 정밀조사가 반드시 필요한 것으로 나타남
  
- 따라서 그림 3-1의 푸른색 점선으로 표시된 천수만 내 퇴적물 오염예상구역에 대한 부영양화 정화지수 및 유해화학물질 정화지수를 공간적으로 조사하여 오염원인지를 정밀하게 분석하고, 오염퇴적물 정화복원사업 기초 자료로 활용할 필요가 있음
  
- 해양수산부 지원사업으로 오염퇴적토 정화사업이 해양환경관리공단, 한국어촌어항협회 등을 통하여 수행 중에 있으므로, 천수만 해역에 대한 국가차원의 대응전략 마련 및 오염퇴적물 정화사업이 적극 추진되어야 함
  - 국내 연안의 빈산소 수괴 발생에 따른 다양한 수산자원 피해가 발생하는 해역 중에서, 유일하게 충남도내 천수만 해역만이 해양오염퇴적물 조사대상지역에 제외되어 있으므로 이에 대한 신속한 조치가 필요할 것임
  - 그러나 천수만 내 오염퇴적토 침적의 원인이 간헐 하구(간월호 및 부남호)로부터의 육상기인 오염퇴적물 유입이므로, 하구호 내 수질 악화를 해결할 수 있는 근본대책의 마련이 동시에 필요함
  
- 지금까지 오염퇴적물 정화사업은 해역의 오염정도가 매우 심각한 특별관리해역을 중심으로 이루어져 왔으나 천수만과 같이 퇴적물 오염정도가 국지적으로 높게 분포하는 지역에 조기에 정화사업을 추진한다면, 짧은 기간 내에 높은 성과를 낼 수 있을 것으로 기대함

- 국립공원연구원. 2014. 2014 태안해안국립공원 해양환경변화 측정망.
- 국립수산과학원. 2009. 한국 연안의 빈산소 수괴.
- 국립수산진흥원. 1985. 연근해 주요어종의 생태와 어장, 예문사, 219.
- 박동원. 1976. 월격탐사에 의한 서해안 천수만 간척지 지형 연구. 과학기술처. R-76-72. 83.
- 이용화 등. 2010. 빈산소 수괴해역 용존산소 환경개선장치 개발과 현장 적용, 해양환경안전학회지, 16, 339-344.
- 정광영. 2015. 천수만의 여름철 해수유동과 물성 및 용존산소 변동 특성, 충남대학교 박사논문.
- 충청남도. 2016. “천수만 고수온 피해어가 복구 현황” 내부자료 인용.
- 충청남도. 2011. 천수만해역 환경조사 및 어장 이용방안 연구용역 최종보고서.
- 한국전력공사. 1985. 보령, 삼천포 T/P냉각수가 연안양식 수산물에 미치는 영향조사(II), 한국전력보고서, KRC-84C-J01, 443.
- 한국해양연구원. 2006. 천수만 새조개 어장의 어장환경 및 어업수익성 감정, BSPG40000-1806-3, 185.
- 해양연구소. 1978. 고정리 화력발전소 건설지점 부근해역에 대한 해양생태학적 기초조사 연구, BSPI 00014-14-3, 138.
- Lim et al., 2006. Hypoxia and benthic community recovery in Korean coastal waters, Mar. Pollut. Bull., 52, 1517-1526.
- S. W. Kweon, 1979. Studies on the distribution of dissolved oxygen on Jinhae Bay in Summer. Bull. Nat'l. Fish. Res., 22, 7-20.
- U.S. Army Corps of Engineering. 1998. Guidance for Subaqueous Dredged Material Capping.

US Environmental Protection Agency. 1994, Assessment and Remediation of Contaminated Sediments(ARCS) Program REMEDIATION GUIDANCE.

US Environmental Protection Agency. 1994, Assessment and Remediation of Contaminated Sediments(ARCS) Program REMEDIATION GUIDANCE.

国土交通省中国地方整備局, 2012. 石炭灰造粒物による底質改善手法の手引き.

국가통계포털(<http://kosis.kr>).

물환경정보시스템(<http://water.nier.go.kr/>).