요 약 문

Ⅰ. 연구개요

마산만 유역의 점 및 비점오염원을 조사하여 외부오염부하량을 산정하고 특성을 분석한다. 또한 마산만 저질의 용출실험으로부터 내부오염부하량을 산정하고 특성을 분석한다. 해역의 표·저층간 수온과 염분밀도에 극적 변화가 있는 여름철과 가을철에 걸쳐서 해역의 수질과 수색의 시·공간의 동적변화를 조사하고, 모든 조사된 지표들(parameters), 수색(water color, 水色)과 다른 지표들 사이에 대하여 분산분석(ANOVA, analysis of variance), 상관분석(Pearson correlation), 회귀분석(regression analysis)을 수행하고 그 결과를 통계학적 기법으로 해석하고 유의성을 검정한다. 이것을 통하여 점 및 비점오염부하량과 수질 및 수색과의 인과관계(cause and effect)를 평가하고 수질과 수색의 결정요인이 무엇인지를 파악한다. 그리고 유역별 오염의 특성과 수색 및 수질의 결정요인을 개선하고 방지하는 국·내외의 기술적 방안을 제시하고자 한다.

Ⅱ. 연구의 목적 및 필요성

마산만은 도시의 경관 조성, 시민의 휴식 공간, 어족자원의 산란장, 항구로서 가치가 높은 바다이나 오염으로 인하여 그 가치가 반감된 상태에 있다. 최근에 마산만의 연안환경을 획기적으로 바꾸는 워터프론트(Waterfront) 조성사업, 해양신도시 조성사업 등이 추진되고 있고, 마산만의 수질 및 수색의 상태는 임해 도시의 품격을 나타내는 지표가 되고 있는 바, 마산만의 수질과 수색의 회복이 이 사업들의 성공을 좌우한다고 생각한다.

최근 들어서 연안오염총량제 실시와 민관산학협의회를 통한 민관과 산업계, 학계의 협력으로 봉암 갯벌이 서서히 회복되고 2000년대 초에 해역수질 3,4등급의 화학적산소요구량이 2등급 수준으로 개선되어 만성적 적조 현상도 완화되는 효과를 나타내고 있다. 그러나 여전히 마산만의 수색은 어두운 색깔을 띠고 있고 수질은

개선되어야 하는 많은 숙제를 안고 있는 것이 현재의 실정이다. 그러므로 마산만 수질과 수색의 개선을 위하여 이에 대한 원인을 파악하고 개선대책 마련을 위한 연구가 필요하다.

Ⅲ. 연구의 내용 및 범위

마산만의 용출(내부) 및 유역(외부) 오염부하량과 마산만의 수질 및 수색을 조사 분석한 후 수질과 수색과의 인과관계(cause and effect)를 파악하고, 유역별 오염의 특성과 수색 및 수질의 결정요인을 개선하고 방지하기 위한 기술적인 관리방안을 제시하고자 다음과 같은 연구내용 및 범위를 정하여 조사하였다.

(1) 마산만의 유역 오염부하량 산정과 특성 분석

마산만 유역을 지형, 하천의 유하방향, 토지이용 상태에 따라 9개의 소유역으로 구분하였다. 유역별 오염부하량(외부오염부하량)을 산정하기 위하여 점오염원은 덕동하수종말처리장의 방류수의 유량과 농도를 기반으로 부하량을 산정하였고, 비점오염 부하량은 유역별 토지이용에 따라 발생되는 오염원을 기반으로 원단위법으로 산정하였다. 또한 유역 내의 인구에 의하여 발생하는 생활하수는 집중호우시 덕동하수종말처리장으로 유입하는 유량을 뺀 나머지를 합류식 하수관거 월류수, 하수관의 누수, 미설치 하수관 미설치 지역 유출 등으로 마산만에 유입하는 것으로 평가하고 비점오염부하량으로 산정하였다.

(2) 마산만의 용출 오염부하량 산정과 특성 분석

용출 오염부하량(내부오염부하량)을 산정하기 위하여 마산만에서 해수시료를 채취한 동일한 조사정점에서 저질(퇴적물) 시료를 채취하였다. 조사정점은 남천과 창원천이 만나는 봉암교 아래에서부터 마산만 중앙선을 따라서 부도 앞 바다까지 7개의 정점을 설정하였다. 저질시료는 직경 50mm 길이 700mm 아크릴관(용출관)을 장착한 중력식 코어채니기를 사용하여 채취한 후 실험실로 운반하고 회분식 용출실험을 실시하였다. 봄, 가을의 저층 수온을 고려하여 16℃에서 15일간, 여름철 저층 수온으로 24℃에서 21일간 배양하였다. 용출수의 수질을 평가하기 위하여 용존산소(DO), 화학적산소요구량(COD), 암모나아성 질소(NH_4^+-N), 아질산성 질소(NO_2^-

-N), 질산성 질소(NO_3^--N), 용해성 무기인(PO_4^{3-}-P), 총질소(TN), 총인(TP)을 해양환경공정시험법(2008)에 따라 분석하였다. 용출 오염부하량은 조사정점을 중심으로 마산만을 5개의 소해역(sub-sea)으로 나누고 각 소해역의 면적에 COD, TN, TP의 용출률(flux)을 곱하여 산출하였다.

(3) 마산만의 수질, 저질 및 수색 조사

마산만 수질의 결정요인, 수색의 결정요인과 이들에 대한 점 및 비점오염부하량의 영향을 파악하기 위하여 부도에서부터 봉암교 아래까지 마산만 해역에 7개의 조사정점을 설정하고 2016년 5월부터 12월까지 조사하였다. 시료는 여름철 장마 시작전(6월), 장마시기(7, 8, 9월), 가을철 갈수기(10월)로 나누어 해수와 저질(퇴적토)를 채취하였다. 시료의 분석은 해수에 대하여는 pH, 수온, 염분도(SAL), 탁도(TURB), 투명도(SECCHI), 용존산소(DO), 부유물질(SS), 화학적산소요구량(COD), 총유기탄소(TOC=DOC+POC), 총무기질소(DIN: NH_4^+-N, NO_2^--N, NO_3^--N), 총무기인(DIP: PO_4^{3-}-P), 총질소(TN), 총인(TP), 용존성 규소(DSi), 클로로필-a(Chl-a), 황화수소(H_2S), 분변계대장균(FC), Hazen Color Unit(HZ Color), Visual Color Unit(VS Color, 현장수색) 등을; 저질에 대하여는 pH, 산화환원전위(ORP), 입도(PSD), 저질산소요구량(SOD), 화학적산소요구량(COD), 총유기탄소(TOC), 총질소(TN), 총인(TP), 산 휘발성 황화물(AVS), 페오색소(Pheo-Pigment), 중금속(Fe, Mn) 등을 해양환경공정시험방법(2008)과 Standard Methods(1995)에 따라 분석하였다. 한편 수색 발생에 대한 철(Fe)과 망간(Mn)의 영향을 파악하기 위하여 각 조사정점의 표·저층수를 각각 10L 이상 채수하여 여과하고 얻어진 부유물질에 대하여 중금속(Fe, Mn)을 분석하였다. 철(Fe)이 수색에 미치는 영향을 파악하기 위하여 표·저층수와 그 여액에 대하여 420nm에서 흡광도를 측정하였다.

(4) 마산만의 수질 및 수색의 형성 요인 분석

마산만의 수질 및 수색 발생 요인을 파악하기 위하여 여름철과 가을철 표·저층수와 저질을 채취하여 분석하였고, 조사된 모든 수질지표들 사이, 수색과 다른 지표들 사이에 대하여 분산분석(ANOVA, analysis of variance), 상관분석(Pearson correlation), 회귀분석(regression analysis)을 수행하고 그 결과를 통계학적 기법으로 해석하고 유의성을 검정하였다. 수질과 수색의 통계학적 분석결과와 계절별 조

사정점별 수질변화 및 점 및 비점오염부하량을 정량 정성적으로 비교하였다. 특히 총유기탄소(TOC), 입자성 유기탄소(POC), 용존성 유기탄소(DOC), 탁도(TURB), 부유물질(SS), 부영양도(EUTRO), 황화수소(H_2S), 염분도(SAL)가 수색에 미치는 영향을 면밀히 분석하였다. 수질 지표 사이 및 수색과 유의성이 있는 상관관계를 나타내는 지표에 대하여 일차회귀분석을 통하여 수질과 수색 결정에 대한 인과관계와 기여도를 분석하였다.

(5) 마산만의 수질 및 수색 개선대책

유역별 오염의 특성과 수색 및 수질의 결정요인을 개선하고 방지하기 위하여 하수유입방지대책, 도시지역 비점오염 유출저감방안, 해양오염퇴적물 처리방안, 해역의 수질(질소, 인) 개선방안 등에 대하여 현재 국내·외에서 연구되고 시행되고 있는 사례들을 종합하여 지자체의 형편에 맞는 개선방법을 선택할 수 있도록 여러 가지 방안을 제시하였다.

Ⅳ. 연구결과

(1) 마산만 및 주변 유역의 개황

마산만은 한반도의 남동쪽 진해만의 북동쪽에 깊숙이 위치하고 있고, 굴곡이 심한 리아스식 해안으로서 입구는 병목처럼 좁고 긴 수리기하학적(hydrogeometry)으로 반폐쇄성 육지 내만(inlet)의 형태를 하고 있어서 폐쇄성이 매우 심하고 연안역을 따라서 해양과 육지의 상호작용의 강도가 매우 큰 특징을 가지고 있다. 마산만은 수심이 얕고 해수 유동 속도는 10cm/sec 이하로서 외해수와의 교환율이 14%에 불과할 정도로 소통이 불량하다.

마산만 유역은 10개의 크고 작은 산이 병풍처럼 에워싸고 있으며, 본 연구의 마산만 해안선의 총 길이는 약 74.1km, 해역의 총 면적은 약 43.7km^2이고, 유역면적(유수면적)은 239.65㎢이며, 유역에는 크고 작은 17개의 하천이 흐르고 있다. 유역별 오염부하량(외부오염부하량)을 산정하기 위하여 SWAT(Soil & Water Assessment Tool)을 이용하여 마산만 유역을 지형, 하천의 유하방향 등을 고려한 배수구역과 토지이용 상태에 따라 9개의 소유역(sub-basin)으로 구분하였다. 유역하천의 길이는 짧고, 직선

적이며 하상경사가 급하여 하천을 통하여 유입되는 오염물질의 영향을 크게 받고 있다. 6~9월 동안 마산만으로 유입하는 주요한 하천인 삼호천, 창원천, 내동천, 남천, 회원천, 우산천을 통하여 1일 약 148,000톤 이상의 담수가 쏟아져 들어옴으로 인하여 마산만은 봉암교 아래에서부터 마창대교까지 거의 대부분 기수해역을 형성하고 있다.

마산만 유역은 행정구역이 경상남도 창원시에 속해있고, 의창구, 성산구, 마산합포구, 마산회원구, 진해구의 5개 구와 43개 행정 동으로 이루어져 있다. 2016년 6월말 기준으로 유역내 총 세대수는 297,791호, 인구는 763,922명이 거주하고 있으며, 유역 내 토지자원은 총면적 240.0km^2 중 임야면적은 132.4km^2로서 55.2%, 경지면적은 17.5km^2로서 7.3%, 대지(도시지역, 도로포함) 및 기타는 89.9km^2로서 37.5%를 점유하고 있다.

마산만의 연안환경은 1974년 창원국가산업단지 조성과 마산수출자유지역 지정 등 임해산업단지 조성 정책 추진에 따라 개발이 추진되었으며, 2013년 이래로 추진중인 워터프론터 사업, 해양신도시 조성사업 등 해양관광도시로의 성공적인 도약을 위해 연안역 개발 사업은 가속화되고 있다.

(2) 마산만 및 주변 유역의 강우 특성

유역내 연평균 강우량은 약 1,466mm이고, 6~9월의 강우량이 연강우량의 69.8%이고, 연평균 기온은 15℃, 최고기온은 28℃, 최저기온은 －1.1℃, 연평균 습도는 62.3%이다. 2016년 9월의 강우량이 522.7mm로서 10년 월평균강우량보다 약 4배 큰 값을 나타내었고, 7, 8월의 강우량은 월평균강우량에 크게 못 미치는 상태를 나타냄으로서 10년 월평균강우량과는 매우 다른 양상을 보여주었다. 2016년 가을철(9, 10월)의 강우량은 예년과는 매우 다른 특징을 보여 주었다.

(3) 마산만 및 주변 유역의 오염부하량 평가

① 인구에 의한 오염부하량

ⓐ 덕동하수종말처리장에 의한 오염부하량

우리나라 전국 평균 하수도설치율은 2014년 현재 72.0%이고, 전국 연안지역의 평균 설치율은 68.0%이다. 창원시의 하수도설치율은 83.5%이다. 그러나 여름철 마

산만의 수색과 수질은 여전히 악화된 상태를 나타내므로 하수관의 오접에 의한 누수, 합류식 하수관의 유출수를 관리하는 것이 매우 중요하다.

덕동하수종말처리장에서 마산만 해역으로 BOD, COD와 같은 탄소 오염부하량이 연간 각각 762.0, 1735.5 ton/year 유입하고, 질소와 인 오염부하량이 각각 1550.1, 103.3 ton/year 유입하였다. TN/TP 오염부하량의 비가 15.0으로서 방류수는 처리수준에 따른 분류에서 인이 제한영양소(limiting nutrient)가 된다. 덕동하수종말처리장의 질소 화합물의 처리효율은 57.7%로서 연간 다량의 질소 오염부하량이 마산만 해역으로 유입되고 있으므로 질소 화합물의 고도처리가 요구된다. 여름철(6~9월) 동안 연간 오염부하량의 30~40% 정도가 해역으로 유입하였다.

ⓑ 합류식 하수관거의 월류수에 의한 오염부하량

합류식 하수관거의 월류수(CSOs)는 과잉의 유량이 발생했을 때 일어나지만 분류식 하수관거의 월류수(SSOs)는 하수관의 균열, 파손 등에 의하여 낮은 유량에서도 발생할 수 있다. SSOs가 하수오염물질을 희석하거나 씻어낼 수 있는 강우유출수가 없는 건기에 일어나면 공중보건에 미치는 위험성이나 환경에 대한 손상은 CSOs보다 훨씬 심대하다. CSOs와 SSOs는 모두 폐수처리시설에 월류(overflows), 최대유량(peak flows)을 유발하여 운전상의 심각한 문제를 발생시킨다.

우리나라 전국 평균 하수관로 보급률은 2014년 현재 77.8%이고, 이 중에서 합류식 하수관거 보급률은 33.6%이고 분류식 하수관거 보급률은 66.4%이다. 창원시 평균 하수관로 보급률은 87.0%이고, 이 중에서 합류식 하수관거 보급률은 7.2%이고 분류식 하수관거 보급률은 79.8%이다.

하수발생량은 분류식 하수관거 보급률(79.8%)과 덕동하수종말처리장 1일 평균 유입유량(338,621m^3/day)으로부터 역산하여 추정하였다. 여기서 분류식 하수관거로 차집한 하수는 100% 이송되는 것으로 가정한다. 합류식 하수관 월류수, 누수, 하수관 미설치 지역으로부터 집중호우시 마산만으로 유입하는 하수량은 85,716m^3/day로 추정된다. 이것을 기반으로 원단위법으로 산정한 오염부하량은 BOD가 1일 9,257kg, COD 24,343kg, SS 31,886kg, TN 771kg, TP 240kg이 된다.

③ 토지이용에 의한 오염부하량

마산만 유역의 총면적은 240.01km^2이고 그 중에서 임야(forest)가 132.45km^2

(55.2%)로서 가장 큰 면적을 나타내고 그 다음이 도로(road)와 도시(urban) 면적을 합하여 72.44km^2(30.2%)를 나타내었다. 오염부하 원단위 값이 큰 도로와 도시면적이 높게 나타난 소유역은 삼호천, 창원천, 남천 소유역으로서 도로면적은 3.37~5.36km^2이고 도시면적은 9.09~17.24km^2이다. 여기에 합포2와 웅남 소유역의 도로와 도시면적을 합하면 각각 15.68km^2와 48.01km^2이고 이는 마산만 유역의 총 도로와 도시면적의 80.8%와 90.5%를 차지하였다.

마산만 유역의 토지이용에 따른 오염부하량 중에서 도로와 도시지역에서 모든 지표의 오염부하량이 가장 높게 나타났다. 도로와 도시지역에서 오염부하량이 가장 높은 지표는 SS로서 각각 11263.3, 13495.8kg/day로 총 SS 부하량의 41.3, 49.5%를 나타내었고 이 둘을 합하면 24759.1kg/day로서 90.9%를 나타내었다.

마산만 유역의 토지이용에 따른 총 비점오염부하량은 BOD가 5710.3㎏/day, COD가 12571.1kg/day, SS가 27266.3㎏/day, TN이 1439.9㎏/day, TP가 166.2㎏/day으로 산정되었다. 또한 연간 발생 비점오염부하량은 BOD가 2.1×10^6kg/year, COD가 4.6×10^6kg/year, SS가 1.0×10^7kg/year, TN이 5.3×10^5kg/year, TP가 6.1×10^3kg/year로 산정되었다.

④ 하천에 의한 오염부하량

하천에 의한 오염부하량 중에서 남천의 SS를 제외하고 삼호천 소유역에서 모든 지표의 오염부하량이 가장 높게 나타났다. TN의 하천에 의한 유달부하량이 토지이용의 원단위 발생부하량보다 약 0.8~2.1배 범위에 평균 1.5배 큰 값을 나타내었다. 이는 유역에서 질소화합물을 다량 배출하는 오염원이 토지이용 외에 상존(尙存)한다는 것을 의미한다.

모든 지표의 연중 유달부하량이 높게 나타난 소유역은 삼호천, 창원천, 남천 소유역으로서 연간 유달부하량이 가장 높은 지표는 SS이고 386.5~527.3kg/day 범위에 합계 1313.8kg/day, 총부하량의 59.3%를 나타내었다. 연간 마산만에 유입하는 하천에 의한 총비점오염부하량은 BOD가 4.0×10^5kg/year, COD가 3.7×10^5kg/year, SS가 8.1×10^5kg/year, TN이 6.8×10^5kg/year, TP가 2.3×10^4kg/year로 산정되었다.

인구수(POP)는 부유물질(SS)과 총질소(TN) 유달부하량 발생에 강력한 요인으로 작용하였고, SS 유달부하량은 TN 유달부하량 발생에, TN 유달부하량은 TP 유달부

하량 발생에 강력한 요인으로 작용하였다. 그러므로 마산만 연안의 도시 인구밀집 지역이 이들 부하량의 주요한 발생원으로 나타났다.

⑤ 저질의 용출에 의한 오염부하량

16℃(봄, 가을)와 24℃(여름)에서 저질 용출에 의한 총 비점오염부하량은 각각 COD 1448.1, 14516.2kg/day, TN 38.2, 7280.2kg/day, TP 362.6, 511.0kg/day이다. COD는 24℃가 16℃보다 약 10배 정도, TN은 약 190배 정도, TP는 약 1.4배 정도 더 많이 용출되었다. 한편 COD 용출 flux는 24℃(여름)에서 조사정점 5에서 390.05mg/m^2/day, TN과 TP 용출 flux는 조사정점 7에서 각각 170.02, 15.33mg/m^2/day로 가장 높게 나타났다.

⑥ 점 및 비점오염부하량 종합

전체 소유역에서 SS, COD, BOD, TN, TP의 순서로 높은 오염부하량이 나타났다. 특히 삼호천, 창원천, 남천 소유역이 모든 지표에서 다른 소유역들보다 높은 오염부하량을 발생하였고 그 중에서 SS 오염부하량이 현저히 높게 나타났다. 이 세 소유역의 SS 오염부하량의 합은 6895.1ton/year로서 전체 발생량의 69.3%를 차지하였다. 여기에 마산만과 인접한 합포2와 웅남 소유역의 SS 부하량을 합하면 8374.9ton/year로서 전체 발생량의 84.2%를 차지하였다.

SS 오염부하량은 토지이용(LAND USE)에서 전체의 95.7%(9952.2ton/year)가 발생하였고, COD 오염부하량은 토지이용에서 55.5%(4588.5ton/year), 덕동하수종말처리장(DKDNG WWTP)에서 21.0%(1735.5ton/year), 저질용출에서 23.5%(1947.6 ton/year)의 비율로 발생하였다. TN 오염부하량은 토지이용에서 17.7%(525.6 ton/year), 덕동하수종말처리장에서 52.2%(1550.1ton/year), 저질용출에서 30.1%(892.8ton/year)의 비율로 발생하였다. 주목할 것은 TN 오염부하량에 대하여 저질용출에 의한 발생비율이 토지이용의 발생비율보다 약 1.7배 정도 더 높다는 것과 점오염원인 덕동하수종말처리장 방류수에 의한 발생비율이 토지이용과 저질용출의 발생비율보다 각각 약 2.9, 1.7배 더 높으므로 저질용출과 덕동하수종말처리장 방류수가 조사해역의 질소화합물 오염에 미치는 정도가 매우 높다는 것이다. TP 오염부하량은 토지이용에서 22.4%(60.7ton/year), 덕동하수종말처리장에서 38.2%(103.3ton/year), 저질용출에서 39.4% (106.6ton/year)의 비율로 발생하였다. 마산

만 내부에서 저질용출에 의하여 발생하는 TP(인화합물) 오염부하량이 토지이용에 의한 오염부하량보다 약 1.8배 정도 더 높은 결과를 나타내었다.

하천에 의한 부유물질(SS)과 총질소(TN) 유달부하량과 해당 소유역의 인구수(POP) 사이에 높은 상관관계가 나타남으로서 인구수(POP)가 이들 오염부하량의 발생에 강력한 요인으로 작용하고, SS 유달부하량이 TN 유달부하량 발생에, TN 유달부하량이 TP 유달부하량 발생에 강력한 요인으로 작용하므로 마산만은 여름철 장마시기에 연안의 도시 인구밀집지대로부터 부유물질(SS)에 의한 오염을 크게 받는 것으로 나타났다. 따라서 이 부유물질을 효과적으로 제거함으로서 총질소와 총인의 유입부하량을 크게 줄일 수 있다. 또한 저질용출에 의한 내부 비점오염부하량은 여름철 고수온기에 주로 일어나서 마산만의 수색과 수질에 막대한 영향을 미치는 것으로 나타났다.

(4) 마산만의 수질 및 저질 현황

① 수질의 시·공간적 변동 특성

ⓐ 수온(TEMP)

여름철 표·저층의 수온 차는 1.2~1.7℃ 범위이고 표층이 평균 1.6℃ 높은 수온을 나타내었다. 가을철은 모든 조사정점에서 표·저층의 수온 차가 나타나지 않아 온도성층이 사라지고 수직혼합이 원활히 일어났음을 나타내었다.

ⓑ pH

창원천, 남천, 삼호천 등의 하천수가 유입하는 조사정점 1~3의 저층수에서 여름철 장마시 다량의 담수 유입으로 인하여 정상적인 해수의 pH 8.3보다 0.7~0.9 정도 낮은 pH 7.4~7.6을 나타내었다. 이것은 하천수의 pH와 유사하고 이러한 현상은 마산만 외해로 이동함에 따라 해수의 비율이 높아져 pH가 점진적으로 증가하는 현상을 나타내었다. 여름철 표층수의 pH가 저층수보다 높은 것은 적조의 광합성 작용에 의한 알칼리도 물질의 생성에 기인한 것이다. 가을철은 표·저층 모두 조사정점 1을 제외하고 해양의 정상적 pH로 회복하였고 적조에 의한 영향이 없으므로 표층수가 저층수보다 약간 낮은 pH를 나타내었다.

ⓒ 염분도(SAL)

여름철 마산만 전체 조사정점의 표층수는 전형적인 해양 염분도(33psu)의 49.7~76.7%에 불과한 기수해역(brackish region)을 나타내었다. 여름철 마산만 전체는 담수와 해수의 염분 밀도차에 의한 수직성층화(vertical stratification) 현상으로 인하여 2차원(이층) 흐름구조(two-layer flow pattern)를 나타내었다. 조사정점 1(봉암교 바로아래, 창원천 남천 유입), 조사정점 3(삼호천 유입)에서 표·저층의 염분도의 차이가 각각 7.2, 8.7psu로 나타나므로 이들 조사정점을 중심으로 사지역(dead zone) 혹은 집중화 지역(convergence region)이 형성되었다. 반면 가을철은 마산만 전체 조사정점에서 표·저층 사이에 염분도의 차이가 나타나지 않았고 결과적으로 2차원 흐름구조도 형성되지 않았다. 여름철 조사정점 1~3 구간을 중심으로 형성되는 사지역(dead zone, convergence region)에는 독성물질을 흡착한 부유물질과 영양염류가 축척되는 퇴적층 지역(deposition zone)이 형성된다.

조사해역의 여름철 표층수와 여름철 저층수, 가을철 표·저층수는 염분도의 차이로 인하여 완전히 다른 해양생태계를 나타내었다. 여름철 표층수는 다량의 담수의 유입으로 기수해역을 형성하였고 조사정점 1에서 만 외측으로 이동하면서 점진적인 염분농도의 구배를 나타내었다.

ⓓ 투명도(SECCHI)

해수 표면에 닿는 햇빛의 85%가 투과하는 깊이(투명도)가 여름철은 수심의 11.4~25.5%이고 가을철은 25.0~44.7%로 나타났다. 햇빛의 99%까지 투과하는 유광층의 깊이는 여름철은 수심의 29.4~65.8%이고 가을철은 64.4~115.0%로 나타났다. 투명도에 의한 영양단계 평가는 여름철은 조사정점 7을 제외한 모든 조사정점들이 투명도 2m 이하로서 부영양상태를 나타내었고, 가을철은 조사정점 1을 제외한 모든 조사정점들이 2~4m 이상으로서 영양 또는 빈영양상태를 나타내었다

ⓔ 탁도(TURB), 부유물질(SS)

조사해역의 여름철과 가을철 전체 조사정점의 표·저층수에서 탁도는 만 외측으로 이동할 때 염분도의 구배에 따라서 일률적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 조사정점 1~2 구간을 제외하고 여름철 표 ·저층수의 부유물질(SS)은 탁도처럼 염분도의 영향을 받아 조사정점에 따라 감소하지 않았다. 반면에 가을철 표·저층수의

부유물질(SS)은 만 외측으로 이동하면서 감소하는 경향을 나타내었다. 이것은 여름철 표·저층수에는 적조의 증식이 있었으나 가을철은 적조의 증식이 미미하였기 때문이다. 여름철과 가을철 표·저층수의 각 조사정점에서 염분도와 탁도 사이에 서로 상반된 관계(inverse relationship)를 나타내었다. 이런 현상은 탁도가 유역에서 담수와 함께 유입한 부유토사(silt와 clay)와 하수유입물질 등에 의하여 주로 형성되고, 조사해역 외측으로 이동함에 따라 염분이온의 응집작용으로 응결 침강하여 점차적으로 농도가 감소하기 때문이다.

ⓕ 용존산소(DO)

여름철 마산만은 엄격한 수직성층화(vertical stratification)로 인하여 조사정점 1를 제외한 여름철 마산만 조사정점들의 표·저층 사이에 현격한 용존산소 농도차가 나타났고, 조사정점 2~4에는 빈산소수괴가 형성되었다. 여름철 표층수의 용존산소 농도는 적조의 광합성 작용에 영향을 받았으며 조사정점 5, 6, 7은 용존산소 과포화상태를 나타내었다. 반면 가을철은 마산만 전체 조사정점에서 수직성층화나 2차원 흐름구조가 형성되지 않아 표·저층의 용존산소 농도에 거의 차이를 나타내지 않았다.

ⓖ 화학적산소요구량(COD), 총유기탄소(TOC = POC + DOC)

조사해역의 화학적산소요구량(COD)은 여름철과 가을철, 표·저층별로 조사정점에 따라 매우 큰 변동을 나타내었다. 여름철과 가을철 저층수는 외해로 이동함에 따라 대략 증가하는 추세를 나타내었다. 여름철 표층수의 입자성 유기탄소(POC)와 총유기탄소(TOC) 농도가 조사정점 1, 2를 제외하고 마산만 외측으로 이동함에 따라 증가하는 것은 적조발생으로 인한 자생적 유기탄소물질이 증가하였기 때문이다. 반면에 여름철 저층수와 가을철의 표·저층수는 조사정점별로 거의 일정한 값을 나타내었다. 용존성 유기탄소(DOC)는 여름철과 가을철, 표·저층별로 조사정점에 따라 큰 변동을 나타내지 않았고, 여름철 표층수는 저층수보다 평균 약 22% 큰 값을 나타내었다.

ⓗ 영양염류와 부영양화

● 영양염류

- 용존성 무기질소(DIN), 총질소(TN)

여름철 하천수 유입으로 인하여 사지역(dead zone, conversion region)이 형성되는 조사정점 1, 3의 표·저층수에서 용존성 무기질소와 총질소 농도가 높게 나타났고, 만 외측으로 이동함에 따라서 감소하는 경향이 나타났다. 가을철은 수직성층화가 형성되지 않아 수직혼합이 원활하게 일어나므로 표·저층 사이에 농도 차이가 거의 나타나지 않았고, 만 외측으로 이동함에 따라서 감소하는 경향이 나타났다.

- 용해성 무기인(DIP), 총인(TP)

용해성 무기인(DIP)의 경우 여름철 표층수에서 조사정점에 따라 큰 농도 변화를 나타내었고, 특히 저층수에서 조사정점 1~4와 조사정점 5~6 사이에 대략 2배 이상의 농도차가 나타났다. 총인(TP)의 경우 여름철 표·저층에서 만 외측으로 이동함에 따라 대략 감소하는 양상을 나타내었다. 가을철의 용해성 무기인과 총인은 수직성층화가 형성되지 않으므로 표·저층 사이에 농도 차이가 거의 나타나지 않았고, 만 외측으로 이동함에 따라 대략 감소하는 양상을 나타내었다. 용해성 무기인(DIP)에 의한 수계의 영양상태의 분류에 의하면 여름철과 가을철 마산만 전체 조사정점의 표·저층 해수의 평균농도가 0.02mg/L를 초과하여 부영양상태를 나타내었다.

- 클로로필-a(Chl-a)

여름철 표·저층의 클로로필-a 농도는 만 외측으로 이동함에 따라서 대략 증가하는 경향을 나타내었고, 조사정점 1~3은 높은 영양염류 농도에도 불구하고 클로로필-a 농도가 낮은 것은 담수유입으로 인한 염분도 저하 등 조류의 증식환경의 변화로 인하여 적조의 성장이 둔화되었기 때문이다. 반면에 가을철은 수직성층화가 형성되지 않아 표·저층 사이에 수직혼합이 원활하게 일어나고 또한 수온이 평균 약 19.6℃로 낮아 조류의 증식환경이 조성되지 않으므로 전체적으로 낮은 클로로필-a 농도가 나타났다.

- 용존성 규소(DSi)

담수유입이 많은 조사정점 1은 여름철과 가을철 표·저층수 모두 용존성 규소의 농도가 높게 나타났고, 조사정점 3은 여름철 표층에서 높은 농도가 나타났다. 마산

만의 용존성 규소는 주로 유역으로부터 담수와 함께 유입되고 전체 조사정점에서 0.062mg/L 이상을 나타내어 규조류의 성장을 제한하는 농도가 아님을 나타내었다.

● 부영양화

여름철 표층수의 용존성 무기질소(DIN)와 용해성 무기인(DIP)의 평균농도는 각각 0.638, 0.054mg/L이며, 이것은 용존성 무기질소와 용해성 무기인에 대한 부영양화 기준인 0.1, 0.02mg/L(환경청수질규제과, 1973)를 초과하여 조사해역이 부영양상태에 있음을 나타내었다. 또한 김 등(1999)이 제시한 용존성 무기질소 0.3mg/L와 용해성 무기인 0.03mg/L의 기준을 초과하여 폭발적으로 적조가 증식할 수 있는 환경을 나타내었다.

- 부영양도(EUTRO)

여름철은 가을철보다 표·저층이 각각 84.4, 66.4% 높은 부영양도를 나타내었다. 여름철의 높은 부영양도는 높은 농도의 용존성 무기질소와 용해성 무기인에 의하여 비롯되었다. 이와 같은 축적된 에너지는 여름철의 충분한 일조량과 함께 적조(조류)의 폭발적 증식(algal bloom)을 예고하는 것이다. 조사정점 1의 여름철 표·저층의 부영양도는 각각 143.3, 78.9의 매우 높은 부영양도를 나타냄으로서 창원천, 남천으로부터 탄소유기물질, 용존성 무기질소, 용해성 무기인이 다량 유입하는 것을 나타내었다.

- N/P 비(N/P ratio)

여름철 조사정점 1~4의 표층수는 N/P≫10, 조사정점 5~6의 표층수는 N/P≪10으로서 전자가 후자보다 약 2.8배 큰 값을 나타내었다. 조사정점 1~4는 조석운동에 의하여 외해수의 유입을 주기적으로 받는 내만이라 할지라도 유역으로부터 담수와 함께 과잉의 질소 영양염류의 유입을 받아 인이 제한영양염류가 되는 담수수계의 특징을 나타내었고, 조사정점 5~6의 표층수는 질소가 제한영양염류가 되는 해역특성을 나타내었다. 여름철 조사정점 1~4의 표층수에서 조류(적조)의 폭발적 성장을 조절하는 데는 인의 농도(i.e., 하수유입)를 유효하게 통제하는 것이 매우 중요한 것으로 나타났다.

- Si/N/P 비(Si/N/P ratio)

조사해역의 Si/N/P 비에 의한 조류성장의 제한영양염류의 비의 값에 따르면 조사정점 1의 여름철 표층수만 인이 제한영양소이고 나머지는 질소가 제한영양소임을 나타내었다.

ⓘ 분변계대장균(FC)

조사해역의 여름철 표층수의 대장균군 수의 변화는 조사정점 1~5까지 MPN법의 검출한계를 초과하는 대장균군 수(>2,400 No./100mL)가 나타났다. 이처럼 많은 분변계대장균 수를 나타낸 것은 하수로 오염된 담수와 함께 용존성 및 비용존성 오염물질(다량의 질소와 인 함유)이 다량 해역으로 유입하였다는 것을 의미한다. 한편 가을철은 조사해역의 모든 조사정점에서 분변계대장균이 200 No./100mL 미만을 나타내어 수산생물 양식, 수영, 관광, 여가선용 등에 아무런 지장이 없음을 나타내었다.

ⓙ 황화수소(H_2S)

조사해역의 여름철 표층수의 황화수소(H_2S) 농도는 전체 조사정점에서 평균 0.017mg/L로 균등한 분포를 나타내었다. 여름철 저층수의 경우는 조사정점 2, 3에서 약 0.04의 값을 나타내었고, 나머지 조사정점에서는 표층수보다 낮은 값을 나타내었다. 가을철 표·저층수는 수온이 낮아 저질의 생지화학반응(biogeochemical reaction)이 느려짐으로 황화수소(H_2S)의 농도는 매우 낮은 값이 나타났다. 그러므로 조사해역에서 황화수소(H_2S)가 가장 문제가 되는 곳은 조사정점 2, 3의 여름철 저층수인 것으로 나타났다.

② 저질의 시·공간적 변동 특성

ⓐ pH, 산화환원전위(ORP)

여름철 조사정점 1에서 pH 6.95를 나타내었고, 나머지 조사정점들은 7.32~7.44 거의 일정한 값을 나타낸 반면 가을철은 조사정점 2를 제외한 모든 조사정점에서 여름철보다 약 0.41 정도 더 큰 pH 값을 나타내었다. 이것은 여름철 고수온 혐기성상태 하에서 저질의 부드러운 유기물질이 혐기성세균에 의하여 분해되었기 때문이다.

조사정점 1을 제외한 모든 조사정점이 황산이온의 환원반응(H_2S 생성), 메탄반응 등이 일어날 수 있는 절대혐기성상태를 나타내었다. 조사정점 4~7에서 가을철이 여름철보다 더 큰 음의 산화환원전위 값을 나타낸 것은 이 조사정점들이 여름철은 세립사로 구성되어 있었으나 가을철은 silt, clay로 구성되어 더 많은 유기물을 함유하고 있기 때문이다.

ⓑ 입도분포(PSD)

조사해역은 평균값으로 여름철은 세립사(fine sand), 가을철은 silt와 clay로 구성되어 있는 것으로 나타났다. 여름철은 조사정점 1, 3, 4는 미세립사(ultra-fine sand), 나머지 조사정점은 세립사로 구성되어 있고, 반면에 가을철은 조사정점 1~3은 세립사(fine sand), 조사정점 4~7은 silt와 clay로 구성되어 있었다.

ⓒ 화학적산소요구량(COD), 총유기탄소(TOC)

조사정점 1을 제외한 모든 조사정점에서 화학적산소요구량(COD), 총유기탄소(TOC) 모두 가을철이 여름철보다 각각 1.28, 1.21배 더 큰 값을 나타내었다. 조사정점 1을 제외한 모든 조사정점에서 계절에 상관없이 COD 값이 일본 저질부영양도기준(일본수산자원보호협회, 1980)인 COD 20000mg/kg을 1.02~1.51배 초과하는 값을 나타내었다. 저질의 COD 값이 저질부영양도기준(20000mg/kg)을 초과한다는 것은 해당 해역의 저질이 현재에 심각한 오염상태로 남아있다는 것을 의미한다.

ⓓ 총질소(TN), 총인(TP)

저질의 총질소는 여름철 마산만 외측으로 이동함에 따라 대략 증가하는 추세를 나타내었고, 반면에 총인은 감소하는 추세를 나타내었다. 가을철은 총질소, 총인 모두 여름철보다 작은 값을 나타내었다. 가을철 총질소는 여름철 총질소와 대략 연동하는 경향을 나타내었으나 총인은 조사정점 1에서 4까지 이동함에 따라 여름철은 감소, 가을철은 증가하는 경향을 나타내었다. 총질소와 총인의 오염원은 인간의 활동으로 말미암아 발생하는 축산폐수, 분뇨, 생활하수, 또는 동식물의 사체 등으로서 해역으로 이와 같은 오염원의 유입을 차단하는 것이 대단히 중요하다.

여름철 C/N 비는 모든 조사정점에서 10이하를 나타내어 저질의 유기물질이 내부생물의 기초생산에 기원을 두었고, 외해로 이동함에 따라 비의 값이 감소하는 경향

을 나타내었다. 반면에 가을철의 C/N 비는 조사정점 1을 제외하고 10 이상을 나타내어 저질의 유기물질이 육상기원을 나타내었고 외해로 이동함에 따라 비의 값이 대략 증가하는 경향을 나타내었다.

ⓔ 저질산소요구량(SOD), 페오색소(Phaeo-pigments)

여름철이 가을철보다 평균적으로 저질산소요구량은 약 1.6배, 페오색소 함량은 약 6배 큰 값을 나타내었다. 여름철 조사정점별로 저질산소요구량(SOD)의 변화와 페오색소의 변화가 대략 연동하는 것으로 나타났다.

ⓕ 산 휘발성 황화물(AVS)

일본수산자원보호협회(1980)의 저질의 황화수소 부영양화기준(0.2mgS/g dry)과 비교하면 조사해역은 여름철 약 1~20배 평균 10배, 가을철 1~18배, 평균 8배 높은 농도를 나타내었다. 조사정점 1~3과 조사정점 4~7 사이에 큰 농도 차이가 나타났다. 조사정점 1~3은 여름철 평균 19배, 가을철 평균 13배 높은 농도를 나타내었고, 조사정점 4~7은 여름과 가을철 동일하게 평균 약 4배 높은 농도를 나타내었다. 조사정점 1~3은 저질층 유기물질이 여름철 고수온기에 혐기성분해를 일으켜 CO_2, CH_4, H_2S 등의 가스가 다량 발생하여 퇴적층을 통과하여 상층수로 올라오면서 바닥의 퇴적물을 부상시켜 수질을 혼탁하게 하고, 햇빛의 투과를 방해하여 수색(water color)을 어둡게 하며, 일시적인 용존산소의 결핍현상을 일으켜 심각한 심미적 손상을 초래하는 상태를 나타내었다.

ⓖ 철(Fe), 망간(Mn)

철(Fe)과 망간(Mn) 모두 가을철이 여름철보다 각각 약 10, 30% 큰 값을 나타내었고, 조사정점 1, 7을 제외하고 외해로 갈수록 증가하는 추세를 나타내었다.

③ 표·저층 수질 특성

마산만은 수리기하학적(hydrogeometry)으로 입구가 좁고 육지내로 길게 뻗은 폭이 좁은 수로형태를 하고 있으며, 해안선을 따라 도심지대, 상업지대, 공장지대가 고도로 집중화되어 있다. 본 조사의 마산만 유역에는 17개의 크고 작은 하천이 산재해 있고, 유로가 짧고 대체로 직선상이며 구배가 급한 특징을 공유하고 있다. 여

름철 폭우시 이들 지대에서 발생한 오염물질들은 일시에 다량 해역으로 유입하고, 해역에는 다량 유입한 담수와 저층의 해수 사이에 염분 밀도차에 의한 이층흐름구조(two-layer flow pattern)가 형성된다. 동시에 표·저층 사이의 수온차에 의한 성층화(thermal stratification)를 형성하며, 해수는 주로 저층을 통하여 흐르고 표층은 기수해역을 형성한다. 마산만의 내부는 조류의 유동 속도가 10cm/sec 이하로 매우 느리므로 표층의 담수는 쉽게 외해로 빠져나가지 못하고 정체하면서 염분 밀도차와 수온차에 의한 엄격한 수직성층화가 여름철 내내 지속되어 표·저층수 사이의 물질교환을 저해한다. 가을철에 표·저층수 사이의 수온차와 밀도차가 없어졌을 때 성층화는 사라지게 된다. 이런 결과는 수질지표 사이의 상관관계의 차이로 그대로 나타났다.

조사해역은 조석현상과 담수유입이 교차하는 복잡한 동적시스템을 나타내는 하구(estuary)의 특징을 강하게 나타내는 해역이다. 여름철 표층수에서 용존성 무기질소(DIN), 용해성 무기인(DIP), 총질소(TN), 총인(TP)은 육상기원 물질인 분변계대장균(FC, 하수유입물질) 및 용존성 규소(DSi)와 강한 양의 상관관계를 나타내었고 해역내에서 지표 상호간에 유의한 양의 상관관계를 나타내므로 이 오염물질들은 여름철 하수로 오염된 다량의 담수와 함께 조사해역으로 유입하고 만 외측으로 이동하면서 용존성 물질은 희석/흡수작용으로, 입자성 물질은 응결 침강작용으로 수중 농도가 감소하였다.

조사해역의 여름철 표층수에서 유역으로부터 다량의 담수와 함께 유입하는 부유토사(silt, clay)와 하수유입물질 등은 염분이온의 표면전하압축에 민감한 외부원적 입자(allochthonous solid) 물질로서 주로 탁도(TURB)로 측정되며, 만의 투명도(SECCHI)에 영향을 미친다. 또한 여름철 표층수는 부영양화로 적조의 증식이 왕성하고, 적조생물입자는 자생적 총유기탄소(TOC = POC + DOC, 입자성 + 용존성 유기탄소) 물질이며 내부원적 입자(autochthonous solid) 물질로서 주로 부유물질(SS)로 측정되며 만의 투명도에 직접적으로 영향을 미친다.

조사해역의 여름철 표층수에서 pH, 용존산소(DO), 염분도(SAL), 총유기탄소(입자성 및 용존성 유기탄소), 부유물질 등은 부영양화로 인하여 적조가 왕성하게 증식하는 것과 관련이 있고, 지표 상호간에 양의 상관관계를 가지는 내부원적 그룹이고, 분변계대장균, 용존성 무기질소, 용해성 무기인, 총질소, 총인, 용존성 규소, 탁도물질(부유토사(silt, clay), 하수유입물질 등) 등은 유역으로부터 하수로 오염된 담수유

입과 관련이 있고, 지표 상호간에 양의 상관관계를 가지는 외부원적 그룹이다. 내부원적 그룹과 외부원적 그룹 사이에는 양호한 음의 상관관계가 항상 성립하였다.

조사해역의 여름철 저층에서 저층을 흐르는 포화농도의 용존산소를 함유한 외해수는 저층의 혐기성상태(hypoxia)를 완화하여 물질의 용출환경 특히 인의 용출을 억제하거나 오히려 흡착하는 변화를 초래하였다.

조사해역의 여름철 저층수에서 용존성 무기질소, 용해성 무기인, 총질소, 총인, 탁도, 부유물질 등이 육상기원 물질인 용존성 규소와 양호한 양의 상관관계를 나타내었고, 해역내에서 용존성 무기질소, 용해성 무기인, 총질소, 총인 사이에 유의한 양의 상관관계를 나타내었다. 이 오염물질들은 여름철 하수로 오염된 다량의 담수와 함께 조사해역으로 유입하고 만 외측으로 이동하면서 용존성 물질은 희석/흡수작용으로, 입자성 물질은 응결 침강작용으로 수중 농도가 감소하였다.

총유기탄소, 입자성 유기탄소, 용존성 유기탄소는 85~89%가 휴믹물질로 되어 있고, 용존성 유기탄소는 유역에서 유입되는 양보다 해역 자체에서 발생되는 양이 더 많은 내부원적 오염물질이다. 조사해역의 여름철 저층수에서 용해성 무기인과 용존산소 사이에 유의한 음의 상관관계가 성립하고, 동시에 용해성 무기인과 수온 사이에 유의한 양의 상관관계가 성립하므로 용해성 무기인은 저질로부터 용출하는 것으로 나타났고, 동시에 용존성 유기탄소도 함께 용출하는 것으로 나타났다.

여름철 조사해역의 조사정점 2, 3 구간에서 저질의 산화환원전위(ORP)는 약 −360mV이고, 이 값에서 저질내부는 황산이온 환원반응(sulphate reduction reaction)이 일어나 황화수소(H_2S)가 다량 발생하여 가스와 함께 재부상한 유·무기물 입자들이 상존하는 환경이 된다. 또한 혐기성상태 하에서 유기탄소, 인산염, 유기산, 환원된 철염과 망간염, 기타 무기물질 등이 생성된다.

조사해역의 여름철 저층수에서 용존성 유기탄소의 농도가 입자성 유기탄소 농도보다 평균 약 2배 정도 더 높으므로 총유기탄소는 용존성 유기탄소의 성격을 더 많이 나타내었다. 탁도와 부유물질은 총유기탄소 및 용존성 유기탄소와 각각 양호한 양의 상관관계를 나타내었고, 탁도와 부유물질 사이에 강한 양의 상관관계를 나타냄으로서 탁도와 부유물질은 총유기탄소를 대상오염물질로 공유하는 것을 나타내었다. 결과적으로 여름철 저층수에서 탁도와 부유물질은 유역에서 유입하는 부유토사(silt, clay), 하수유입물질, 저질에서 용출한 총유기탄소와 재부유 입자를 대상오염물질로 공유하는 것으로 나타났다.

조사해역의 가을철 표·저층수는 여전히 부영양화 상태에 있다하더라도 수온이 낮으므로 적조 성장이 미미하다. 유역으로부터 담수유입이 적어 육상물질이 적게 유입할 뿐만 아니라 수직 성층화가 사라짐으로서 표·저층에 높은 염분도 형성되어 육상입자물질의 응결 침강이 빠르고 크게 일어나므로 표·저층수 모두 육안으로 관찰한 현장수색(VS Color, apparent color) 값이 매우 작으므로 심미적인 문제를 유발하지 않았다. 투명도에 의한 영양단계 평가는 여름철은 부영양상태를 나타내었고, 가을철은 영양 또는 빈영양상태를 나타내었다. 조사해역은 심미적으로 여름철은 혼탁했으나 가을철은 맑고 깨끗한 상태를 나타내었다.

(5) 마산만의 수색 현황

① 수색의 시·공간적 변동 특성

조사해역의 여름철 표층수와 저층수의 수색 유발 기작(mechanism)이 다르게 나타났다. 표층수의 수색은 인간의 심미적인 관점에서 보다 중요한 가치를 가지며, 저층수의 수색은 해양의 생지화학적(biogeochemistry) 관점에서 보다 중요한 가치를 가진다. 그리고 여과하지 않은 시료와 여과한 시료는 모든 조사정점의 표·저층수에서 수색(HZ Color)에 큰 차이를 나타내었다. 여과한 시료의 수색(HZ Color)은 거의 0~5 TCU를 나타내었다. 이로써 표·저층수 모두 수색(HZ Color)은 입자성 물질에 의하여 발생하는 것으로 나타났다.

② 표층 수색 결정요인

조사해역에서 여름철 표층수의 수색(HZ Color) 발생 원인이 조사정점 1과 조사정점 2~7 사이에 서로 다른 것을 알 수 있다. 조사정점 1은 주로 담수에 의하여 유입하는 탁도물질(외부원적 입자물질 = 부유토사(silt, clay), 하수유입물질 등)이 원인이 될 수 있고 조사정점 2까지 탁도물질이 급격히 침강하면서 동시에 수색(HZ Color)도 개선되는 효과를 나타내었다.

일반적으로 부유물질 20mg/L 이하, 탁도 5 NTU 이하는 투명한 수역으로 분류된다. 조사정점 2에서 부유물질 18.9mg/L, 탁도 4.4 NTU로서 투명한 수역으로 분류되나 만 외측으로 이동하면서 탁도는 계속 낮아지는데 조사정점 2~7에서 수색(HZ Color), 부유물질(SS), 총유기탄소(TOC), 입자성 유기탄소(POC), 클로로필

-a(Chl-a)는 오히려 거의 동일하게 변화하는 형태를 나타내었다. 이것은 색깔을 띠는 새로운 수색 발현물질이 발생했기 때문이다. 조사해역의 여름철 표층수에서 색깔을 나타내는 물질은 적조생물입자와 휴믹물질인 착색된 용존성 유기물질(CDOM)을 생각할 수 있다. 적조생물입자는 자생적 입자성 유기탄소(POC) 물질이다. 그러므로 조사정점 2~7에서 수색(HZ Color)은 탁도물질(CDOM, 부유토사(silt, clay), 하수유입물질 등)에 의하여 나타나는 수색에 적조의 증식과 외부 유입에 의한 입자성 유기탄소(POC)를 포함하는 부유물질(SS)이 일으키는 수색이 더하여져서 증폭된 결과로 나타난 것이다.

조사해역의 여름철 표층수의 수색(HZ Color)은 외부원적 입자물질(탁도물질)에 의하여 주도적으로 일어나지 않고 부영양화로 인한 적조증식 등 염분이온의 영향에 민감하지 않는 내부생산물질이 수색(HZ Color) 발생의 주요한 동력(driving force)으로 작용하였다. 즉 수색을 유발하는 주된 물질(major material)은 총유기탄소(TOC)를 포함하는 부유물질(SS)이고 부물질(minor material)은 탁도물질로 나타났다. 조사해역의 여름철 표층수의 수색(HZ Color)의 변화는 투명도(SECCHI)의 변화와 거의 정확히 역상관관계(inverse relationship) 가지며 현장수색(VS Color, apparent color)으로 그 결과가 나타났다.

조사해역의 가을철 표·저층수는 여전히 부영양화 상태에 있다하더라도 수온이 낮으므로 적조 성장이 미미하고, 유역으로부터 담수유입이 적어 육상물질이 적게 유입할 뿐만 아니라 수직 성층화가 사라짐으로서 표·저층에 높은 염분도가 형성되어 육상입자물질의 응결 침강이 빠르고 크게 일어나므로 표·저층수 모두 육안으로 관찰한 현장수색(VS Color, apparent color) 값이 매우 작아 심미적인 문제를 유발하지 않았다. 한편 가을철 표층수에서 색도계로 측정한 수색(HZ Color)은 – 가장 큰 수색(Hz Color) 값이 10 TCU 이하 – 탁도(TURB), 총유기탄소(TOC), 입자성 및 용존성 유기탄소(POC, DOC)와 거의 일치하는 변화 형태를 나타내었다. 가을철 표층수에서 총유기탄소(TOC)는 용존성 유기탄소(DOC) 2와 입자성 유기탄소(POC) 1의 비로 구성되어 용존성 유기탄소(DOC)가 총유기탄소의 성격을 지배하였다. 그러므로 조사해역의 가을철 표층수의 수색의 발생 요인은 총유기탄소를 포함하는 탁도물질(CDOM, 부유토사(silt, clay), 하수유입물질 등)로 나타났다. 가을철 표층수는 부영양화로 인한 적조 성장이 미미함으로 부유물질(SS)이 수색(HZ Color) 발생 요인으로 나타나지 않았다.

조사해역의 가을철 표층수는 해수와 담수의 염분 밀도차에 의한 이층흐름구조(two-layer flow pattern)와 온도성층(thermal stratification)이 사라져서 표층수와 저층수 사이에 물질교환이 원활하여 표층수에 보다 높은 염분도가 형성되므로 탁도물질은 조사정점 1~2 구간에서 빠르게 응결 침강 완료함으로서 투명도의 변화에 큰 영향을 나타내지 못하였다. 가을철 표층수의 수색(HZ Color)의 변화는 염분도(SAL)의 변화와 거의 정확히 역상관관계(inverse relationship)를 가지며 만 외측으로 이동하면서 염분도의 구배에 따라 점점 사라져 갔다.

③ 저층 수색 결정요인

조사해역의 여름철 저층수의 수색은 여름철 담수유입으로 다량 유입하는 외부원적 입자물질(silt와 clay, 하수유입물질 등)의 탁도물질에 의하여 주로 형성된 수색에 조사정점 1~3 구간에서 저질에서 용출한 황화수소(H_2S) 그리고 저질 용출과 유역의 유기성 비점오염물질(하수유입물질 등)의 유입에 의한 용존성 유기탄소(DOC, CDOM)에 의하여 수색(HZ Color)이 증폭되고 만 외측으로 이동하면서 해수의 희석작용으로 그 효과는 점차 사라지는 것으로 나타났다.

가을철 저층수도 여름철과 동일하게 탁도물질이 주요한 수색의 원인물질로 나타났으나 용존성 유기탄소(DOC)와 황화수소(H_2S)에 의한 영향은 나타나지 않았다. 한편 가을철은 여름철보다 유역으로부터 부유토사와 하수유입물질의 유입량도 적고 조사정점 1~2 구간에서 여름철보다 높은 염분도(SAL)의 영향으로 더 신속히 응결침강 완료되므로 수색 형성에 미미한 결과를 나타내었다(그림 15, 79, 80 참조). 여름철과 가을철 저층수에는 적조의 증식이 원활하지 않고, HZ Color와 EUTRO 사이에 유의한 상관관계가 나타나지 않으므로 부영양화가 수색에 영향을 미치지 않았다.

조사정점 2, 3에서 저질의 산화환원전위(ORP)는 약 −360mV이고, 이 값에서 저질내부는 황산이온 환원반응(sulphate reduction reaction)이 일어나 황화수소(H_2S)가 다량 발생하여 가스와 함께 재부상한 유·무기물 입자들이 상존하는 환경이 된다. 또한 혐기성상태 하에서 유기탄소, 인산염, 유기산, 환원된 철염과 망간염, 기타 무기물질 등이 생성된다. 여름철 저층수의 수색(HZ Color)은 황화수소(H_2S)가 가장 많이 발생한 조사정점 2, 3에서 가장 높게 나타났다. 황화수소(H_2S) 자체는 무색의 기체이므로 수색을 발생하지 않는다. 황화수소(H_2S)가 부유물질 중의 철이나 망간을 환원시킬 경우 검은색의 황화철(FeS)과 황화망간(MnS)을 만들어 수색을 나타내

거나 또는 저질층에서 만들어진 황화철(FeS)과 황화망간(MnS)이 콜로이드입자 상태로 황화수소(H_2S) 가스와 함께 상층수로 부상하여 수색을 나타내는 것이다.

④ 수색과 철 및 망간의 관계

마산만의 8월 표층수의 수색(HZ Color) 형성에 철 이온(Fe^{3+})은 매우 중요한 요인으로 나타났다. 부유물질(SS) 지표와 밀접한 관련이 있는 총유기탄소(TOC) 물질(85~89% 휴믹물질)이 나타내는 수색에 부유물질 중의 철($(Fe)_{SS}$)(주로 Fe^{3+})이 결합하여 증폭되어 나타나는 것으로 판단되었다. 부유물질 중의 망간($(Mn)_{SS}$)은 조사해역의 8월 표층수의 수색(HZ Color) 형성에 관계하지 않는 것으로 나타났다. 그러므로 마산만의 여름철 표층수에서 나타난 수색은 총유기탄소(TOC = DOC + POC; 부유물질과 탁도와 밀접한 관련이 있음) 물질과 용존 철(Fe)이 결합하여 증폭되어 나타난 결과이다.

(6) 마산만 수질 및 수색의 개선대책

마산만의 수질 및 수색의 조사와 자료의 분석으로 파악된 수색의 근본적 원인 물질은 탁도와 부유물질의 대상물질 중의 총유기탄소(TOC=POC+DOC, 입자성 유기탄소+용존성 유기탄소), 영양염류(인, 질소), 철, 황화수소 등이다. 이러한 물질들의 유입원은 연안에 접한 도시 인구밀집지대의 점 및 비점오염부하량(CSOs 포함)과 저질용출(오염퇴적물) 등이다. 이 오염원들을 처리하는 현재 국내에서 연구되고 시행되고 있는 여러 가지 방안을 제시하였다.

① 하수유입 방지대책

합류식 하수관 월류수, 누수, 하수관 미설치 지역으로부터 집중호우시 마산만으로 유입하는 하수량은 85,716m^3/day로 추정된다. 이것을 기반으로 산정한 오염부하량은 BOD가 1일 9,257kg, COD 24,343kg, SS 31,886kg, TN 771kg, TP 240kg이 된다. 합류식 하수관거에서 배출되는 월류수(combined sewer overflows, CSOs)와 분류식하수관거에서의 월류수(separated sewer overflows, SSOs)는 도시지역 비점오염부하량중 가장 큰 비중을 차지하며 CSOs 및 SSOs에 대한 처리 대책이 없는 한 도시하천과 연한 만의 수질개선을 기대하기란 어려운 실정이다.

ⓐ 합류식 하수관거 월류수(CSOs)와 분류식 하수관거 월류수(SSOs)의 유량과 오염 특성

CSOs는 과잉의 유량이 발생했을 때 일어나지만 SSOs는 하수관의 균열, 파손 등에 의하여 낮은 유량에서도 발생할 수 있다. SSOs가 하수오염물질을 희석하거나 씻어낼 수 있는 강우유출수가 없는 건기에 일어나면 공중보건에 미치는 위험성이나 환경에 대한 손상은 CSOs보다 훨씬 심대하다. CSOs와 SSOs는 모두 폐수처리시설에 월류(overflows), 최대유량(peak flows)을 유발하여 운전상의 심각한 문제를 발생시킨다.

ⓑ 합류식 하수관거 월류수(CSOs) 오염부하 저감대책

● 기초자료의 지속적 축적 및 관리 매뉴얼 마련

기초자료의 지속적인 축적과 이에 대한 충분한 평가가 진행되어야 함은 어떠한 오염원을 관리 또는 제어하는 과정에서 반드시 필요한 부분이다. 특히 비점오염원은 발생특성상 지역적으로 상이하게 발생되고, 지역적으로 규제 또는 관리방안도 달리 적용되어야 하기 때문에 가능한 많은 자료의 평가와 이것을 근거한 관리가이드라인 또는 매뉴얼의 보급이 필요하다.

● 저류형 시설의 적용

저류형 시설은 비점오염원 및 우수유출수의 유출저감을 위한 가장 일반적인 방법 중의 하나이다. 우수저류시설은 일반적으로 도시 지역외 저류시설(off-site retention)과 도시 지역내 저류시설(on-site retention)로 분류한다. 지역내 저류시설로는 공원, 학교운동장, 광장과 같은 공공시설에 저류시설을 설치하는 경우와 공동주택의 동과 동 사이, 주차장 등에 저류형 시설을 설치하는 경우가 있으며, 단독주택의 경우에도 지상화단이나 대지내에 소규모 저류시설을 설치할 수 있다.

● 장치형 시설의 적용

우수유출수에 포함된 오염물질를 제거하기 위하여 물리·화학적 장치를 이용하는 관리기술로서 스크린, 모래 등을 이용한 여과형, 상품화된 제품(Stormfilter,

Stormceptor, Stormget, Swirl Sconcentrators / Vertex solids separators, 유수분리장치)등이 있다.

● 하수처리형 시설의 적용

고도로 개발된 지역의 경우에는 우수유출수에서 오염물을 제거하기 위한 방법으로 하수처리형 시설을 설치하여 직접 처리하는 방법도 가능하다. 특히 합류식 하수관거의 초기 우수월류수는 오염도가 상당히 높으므로 해역으로 유입하기 전에 초기우수를 처리하는 것이 바람직하다. 처리방법은 크게 물리·화학적 응집·침전 처리, 물리·생물학적 방법이 적용되고 있다.

● 기존 우수토실의 구조 및 기능 개선

기존에 설치되어 있는 우실토실은 대개 오리피스형 또는 웨어형으로 구분되며, 건기하수량의 3배량을 차집하는 기능을 목적으로 시설되어 있다. 우수토실은 CSOs가 발생되는 최초 시설이며 적정한 차집이 이루어져야만 방류오염부하를 적정관리할 수 있기 때문에 부적절한 우수토실 구조로는 CSOs 저감관리목표를 설정하는 단계부터 어려움을 겪을 수밖에 없다. 따라서 정확한 수리학적 평가를 통한 우수토실의 설계, 지역특성에 적합한 다양한 형태의 우수토실 시설적용, 협잡물의 정기적인 제거와 준설만으로도 현재 발생되고 있는 상당한 부분의 CSOs 방류오염부하를 줄일 수 있다.

● 빗물펌프장(유수지)을 이용한 CSOs 처리방안

기존의 유수지를 활용하여 CSOs를 저류함으로서 오염부하를 저감시키기 위한 패턴별 운영방안은 다음 그림 124와 같이 유수지내의 유입개시조건과 방류조건에 따라서 1~4의 형태로 저류방식과 용량이 변화하며, 시간최대오수량(1Qs)은 하수종말처리장으로 보내지고 그 이상 유입수는 각 유수지의 조건에 따라 달라진다.

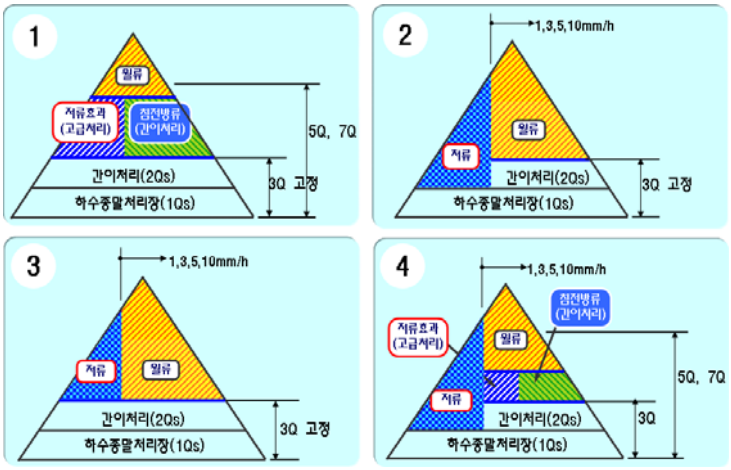


그림 124. 유수지를 이용한 CSOs 관리방안

● 녹색기반시설의 확충

CSOs를 관리하기 위하여 녹색기반시설(green infrastructure)과 저영향개발(low impact development)을 사용할 수 있다. 현재 녹색기반시설이 CSOs를 관리하는데 더 많이 적용되고 있다. 녹색기반시설은 옥상정원(green roof), 나무, 빗물정원(rain gardens), 투수성 포장(permeable pavement) 등과 같이 강우시 비를 집수 혹은 흡수하여 우수 유출수를 줄이고 인근 하천의 건강성을 향상하는 분산형 빗물관리 방법이다. 녹색기반시설로서 중요한 도시개발 사례는 도시하천 개복(daylighting)이다. 도시하천의 개복이 제공하는 이점을 다음 5개 그룹으로 분류할 수 있다.

- 공원 편의시설 조성
- 경제 발전 및 홍수 저감
- 생태계 복원
- 야외 교실 및 캠퍼스 시설 확충
- 주거용 개복(residential daylighting)

녹색기반시설은 오염 감축, 탄소 저감, 열 스트레스 저감(heat stress reduction) 등의 금전적 가치로 평가할 수 있고, 또한 부동산 가치 변화, 녹지와 같은 공공 편의시설의 가치 변화 등을 창출할 수 있다. 현재 녹색기반시설이 잠재적

지속가능성의 세 가지 목표인 환경, 경제, 사회적 성과를 모두 만족시킬 수 있다는 점에서 친환경 CSOs 저감기술로 주목받고 있다.

② 도시지역 비점오염물질 처리대책

마산만 유역에서 도시지역이 밀집한 삼호천, 창원천, 남천 소유역이 모든 지표에서 다른 소유역들보다 높은 오염부하량을 발생하였고 그 중에서 SS 오염부하량이 현저히 높게 나타났다. 마산만과 인접한 인구밀집지역인 이들 도시지역에서 발생하는 오염부하량을 제어하는 것이 마산만 수질과 수색에 대단히 중요하다.

ⓐ 도시지역 비점오염원 유출저감방안

● 처리시설에 의한 비점오염원 유출저감방안

도시지역 비점오염원 저감의 가장 효과적인 방법은 비점오염원 유출저감과 아울러 우수유출 저감효과도 기대할 수 있는 방법이다. 이러한 방법으로는 저류형과 침투형이 대표적이다. 저류형과 침투형은 시설설치에 필요한 부지면적이 커서 기존의 도시지역에 새로이 설치하기에는 무리가 있다. 따라서 기존 도시지역의 경우는 이미 설치되어 있는 강우 저류시설을 최대한 활용하는 방안을 강구하여야 한다. 새로 처리시설을 설치할 경우에는 장치형 처리시설이 적합하다. 장치형 처리시설은 부지소요가 작아 신규 개발되는 도시 및 기존 도시에 구분 없이 적용 가능하며, 지하화할 수 있어 처리시설에 대한 주민들의 거부감을 배제할 수 있다. 특히, 관말에 설치하는 시설이기 때문에 기존 도시지역의 합류식 하수관 월류수 처리에도 적용 가능하다.

● 즉시 적용 가능한 비점오염원 유출저감방안

비점오염원의 관리대책 중에 가장 효율적인 방법은 발생원에서 제어하는 것이다. 국내의 현재 실정을 감안할 때 특별한 제도정비나 시설투자 없이 도시지역에서 적용할 수 있는 비점오염원 관리방안은 다음과 같다.

- 도로청소

개략적으로 도시지역이 불투수층인 경우, 거리청소를 실시하면 비점오염원의

15~25%를 줄일 수 있고, 또 우수저류시설을 적절히 설치하여 운영하면 50%의 도시 비점오염원을 저감시킬 수 있다.

- 침식방지 및 침투능력 증대

나대지에는 식생을 조성하여 침식을 방지하고 토양표면을 보호한다. 침투능력 및 지표저류 능력을 증대하기 위하여 차량의 통행이 적고 노면에 대한 하중이 크지 않은 주차장 등에는 투수성 포장을 실시하여 지하 침투능력을 증대시킨다.

ⓑ 비점오염원 관리를 위한 제도정비 방안

비점오염원 저감을 위해서는 관련제도의 정비가 필수적이다. 관련제도의 제·개정을 통해 비점오염원 유출을 규제하고 처리시설 설치에 정부의 지원을 가능하게 하도록 하여야 한다.

● 도시지역 우수유출 및 비점오염원 유출저감시설 설치기준 마련

도시지역 우수유출 저감은 비점오염원 유출저감과 직결된다. 침투시설 등의 우수유출 저감시설은 오염원 유출저감과 아울러 첨두유출을 줄여 홍수 피해를 저감시킬 수 있고, 지하수 함양을 증대시키는 등 다양한 이점을 제공하고 있다. 이러한 시설이 도시지역에 적용되기 위해서는 관련 법규 또는 시방서에 설치기준이 제시되어야 한다. 기존 도시지역에 적용할 수 있는 시설과 신규로 조성되는 주택단지와 산업단지의 개발계획 수립시 적용할 수 있는 비점오염원의 침투시설 및 저류시설 설치지침을 제시하여야 한다. 단위시설별 우수유출 저감시설 설치기준 제시 및 일정 규모 이상의 시설에 대해서는 우수유출저감시설 설치를 의무화하도록 한다.

● 비점오염원 관리계획 수립

4대강 유역내 일정 규모 이상의 도시와 산업단지에 대해 비점오염원 유출특성 조사와 이에 대한 중장기적인 대책수립이 가능하도록 비점오염원 관리계획을 수립하도록 한다. 세부적인 시행방안은 현행 총량규제 시행방식과 유사하게 자율적인 비점오염원 관리제로 운영하되 비점오염원 관리계획을 수립한 지자체에는 정부에서 인센티브를 부여하도록 한다.

● 개발사업에 대한 환경영향평가시 비점오염원 처리대책 제시

산업단지의 경우는 환경영향평가 협의시 비점오염원 처리대책 수립이 요구됨으로 저류시설 형태의 처리시설을 설치한 사례가 있으나, 시설의 유지관리에 많은 문제점이 나타나고 있다. 이는 유역의 특성을 고려하여 처리방법을 선정하지 않았고, 시설의 규모결정 및 설계에 대한 경험부족에 그 원인이 있다고 할 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 국내 여건에 적합한 비점오염원 저감시설에 대한 설계기준이 제시되어야 하며, 이러한 설계기준을 근거로 신규 개발사업은 환경영향평가 단계에서 비점오염원 저감대책이 수립되도록 하여야 한다.

③ 내부오염부하량 경감대책

ⓐ 해양오염퇴적물 처리방안

현재 일반적으로 많이 사용되는 정화복원 방법은 장기간 모니터링이 필요한 자연정화방법(monitored natural recovery), 오염된 퇴적물을 오염되지 않은 청정물질로 피복하는 현장피복방법(in-situ capping) 및 오염된 퇴적물을 물리적으로 제거하는 준설(dredging) 등이 있다.

적절한 처리방안의 선택은 특정 오염물질의 존재 및 유해성, 정화기간 중 해역의 이용 문제, 영향을 받는 지역의 면적, 복구 방안의 실용 가능성, 해당 지역의 수리특성, 정화에 소요되는 시간, 정화와 관련된 책임 소재 및 지역의 사회·경제학적 요소 등의 많은 요인에 의해 좌우된다., 미국 등 선진국의 경우 조건만 충족된다면 자연정화법을 해양오염퇴적물 처리를 위한 기본적인 방법으로 채택하고 있다.

● 자연정화방법(Monitored natural recovery)

자연정화방법은 저질(퇴적물)의 독성물질 등이 자연의 생화학적 반응을 통하여 자연스럽게 분해되고 정화되는 과정에 근거하고 있다. 그러나 단순히 자연분해에 의하여 정화되는 것을 기대하는 것이 아니라 오염원의 차단과 오염 현장과 더불어 그 주변해역에서 지속적으로 환경 모니터링이 이루어지고 그 자료를 바탕으로 위험도 조사, 환경영향평가 및 사회경제학적 영향평가가 수행되어야 성공적으로 효과를 거둘 수 있다.

자연정화방법의 최대 장점은 환경변화에 민감한 생태계에 큰 변화 없이 시행이 가능하다는데 있고, 단점은 해역의 자연정화능력이 항상 일정하지 않고 외부의 인위적 혹은 자연적인 요소로 인하여 정화능력이 현저히 떨어지고 오염 퇴적물의 확산이 일어날 가능성이 있다는 것이다.

육상오염원이 완벽하게 제어되고 안정된 퇴적층 환경과 생화학적 분해 가능성이 매우 높은 지역일 경우에는 자연정화방법이 비용대효과면에서 오염된 퇴적물을 정화복원하기 위한 주요한 방법 중의 하나가 될 수 있다.

● 현장피복방법(in-situ capping)

표면피복방법은 자연정화방법이 불가능한 경우 선택할 수 있는 처리공법으로서 오염퇴적물을 제거하지 않고 현장에서 직접 처리하는 방법이다. 표면피복방법은 세 가지 주요한 기능, 즉 물리적 고립(표면피복), 안정화/침식방지, 그리고 화학적 고립(주위와 차단 또는 봉입)으로 구성되어 있다.

물리적 고립은 모래, 자갈, 지오텍스타일, 지오그리드 등의 다양한 피복재를 이용하여 해양환경이 오염된 침적물에 노출되지 않도록 해야 하며, 이때 표면피복물질들의 고화도를 고려해야 한다. 오염퇴적물이 주위에 미치는 악영향을 차단하기 위해 오염물질의 종류와 차단지역의 안정성에 따라 표면피복물질로서 금속쉬트, 흙벽, 자갈(흙 혼합)벽 등을 삽입 및 설치하는 방법이 사용될 수 있으며 그 외 다양한 방법이 있다. 안정화와 침식방지는 오염된 침적물과 표면피복방법 그 자체를 표면 피복된 장소에서 고착화하여 안정화하기 위해 고려되어야 한다. 화학적 고립은 오랜 시간이 경과하여도 피복면표면과 해수의 접촉면 사이에서 일어나는 표면화학반응으로 물질의 이류확산이 수식방향으로 일어나지 않도록 철저히 주위와 차단 또는 봉입하여야 한다.

표면피복방법의 가장 큰 장점은 자연정화방법이나 준설 등에 비해 상대적으로 빠른 시일 안에 오염된 퇴적물을 해양환경에서 고립화시킬 수 있는 것이고, 인프라 시설이 필요하지 않기 때문에 비용적인 측면에서도 매우 유리하며, 육상처리시설을 최소화 할 수 있고 준설퇴적물 처리에 불가피한 악취나 지하수 오염 등 이차오염을 최소화할 수 있는 것이다. 한편 표면피복방법의 가장 큰 단점은 해양퇴적층에 여전히 오염퇴적물질이 존재하며, 예기치 않은 사고로 오염물질이 해양생태계에 유출될

수 있으며, 표면피복물질로 사용된 퇴적층이 원래의 해양저층환경과 조화를 이루지 못하여 오히려 해양생태계에 악영향을 미칠 가능성이 있다는 것이다.

● 준설방법(dredging)

여러 가지 오염퇴적물의 처리방법이 있지만 오염퇴적물을 근본적으로 대상 환경 내에서 제거한다는 점에서 준설을 통한 퇴적물 제거가 지금까지 가장 기본적인 처리방법으로 인식되어 왔다. 환경준설(environmental dredging), 즉 오염퇴적물의 준설에 있어 특별히 고려해야할 것은 오염퇴적물의 재부유와 수반된 오염물질 누출의 최소화 및 제거작업의 정확성이다.

준설방법의 장점은 오염퇴적물이 장기적으로 해양생태계에 미치는 영향이 크거나 혹은 예측하는데 어려움이 많을 경우 실효적으로 선택할 수 있다는 것이고, 단점은 준설과 운반에 따른 이차오염을 피할 수 없다는 것과 준설된 퇴적물을 후처리하는 과정에 전체적인 비용이 자연정화방법이나 표면피복방법에 비해 높다는 것이다.

준설방법은 크게 기계식, 유압식 방법으로 나누어지는데 기계식은 퇴적물에 직접적인 힘을 가하여 퇴적물을 제거함으로 퇴적물의 재부유가 심하고, 유압식은 원심펌프를 이용하여 퇴적물을 흡입하는 방법으로서 일반적으로 퇴적물 제거를 원활히 하기 위해서 흡입부에 커터헤드를 장착하고 있다. 유럽이나 일본에서는 유압식의 일종인 압축식 준설방법을 사용하며 준설물질의 흡입을 위해 원심력 대신 압축공기 또는 정수압을 이용한다는 차이점이 있고, 다른 방법에 비해 준설중 퇴적물 재부유가 상대적으로 적다는 장점이 있다.

④ 굴 암초에 의한 수질개선

마산만은 여름철 저질용출과 연안의 도시 인구밀집지대로부터 부유물질(SS)과 총질소(TN) 오염부하량의 영향을 크게 받고 있다. 여름철 표층수는 용존성 무기질소(DIN)가 평균 0.638mg/L, 용해성 무기인(DIP)이 0.054mg/L로서 수온, 염분, 일조량 등 다른 조건이 충족되면 폭발적으로 적조가 증식할 수 있는 부영양화 상태에 있다. 마산만은 대부분의 해역이 인이 적조성장의 제한영양소가 될 정도로 질소 영양염류의 오염이 심한 해역이다.

인위적으로 굴 암초(oyster reefs)를 설치하는 것은 생태계 복원 프로그램으로서 미국의 연안을 가진 모든 주들은 굴 패각 리사이클링 프로그램(OSRP)을 운영하고 있으며, 시민들로부터 굴 패각을 수집하기위한 수집소를 운영하고 있다. 굴 암초 제작에 사용하는 굴 패각은 6개월 동안 물을 살포하고 건조하는 것을 반복하여 유기물을 완전히 제거한 백색 굴 패각이다. OSRP는 깨끗한 백색 굴 패각을 덩어리로 묶어서 연안에 설치하여 굴 암초(oyster reef)를 만든다. 굴 암초는 조간대(intertidal area)에 단단히 고정하여 쌓아놓거나 평균해면 1~1.5m 아래에 조류나 선박 파도에 휩쓸리지 않도록 고정하여 설치한다. 굴의 유생(larvae)은 굴 암초의 패각에 붙어서 성장한다.

굴 암초의 생태계 역할에는 여과에 의한 수질정화 효과(filtration), 영양염류(인, 질소)와 유기탄소를 흡수하여 생물퇴적(biodeposition)하는 효과, 탈질효과(denitrification), 탄소의 격리 제거(sequestration of carbon), 다른 생물체의 서식지 제공(habitat provision) , 해안선의 안정화와 침식 방지(shorelines stabilization and erosion reduction) 등이다.

● 수질정화효과(filtration)

이매패인 굴은 먹이를 섭취하면서 4~40L/hr/개체의 엄청난 양의 물을 여과한다. 이때 유역으로부터 토양의 침식에 의한 부유토사(silt, clay), 부영양화로 인한 식물성플랑크톤(적조생물), 영양염류, 기타 입자성물질을 해역으로부터 제거한다. 적조생물과 부유토사는 해역의 투명성(clarity)과 수색(water color)에 직접적으로 연관된 물질이므로 굴의 여과작용으로 해역의 투명도는 크게 향상될 수 있고, 결과적으로 수중수생식물(SAV)의 성장을 촉진한다. Cressman et al.(2003)는 North Carolina 주에서 수행한 현장조사을 통하여 굴은 수중 클로로필-a 농도를 10~25%까지 감소시키고, 분변계대장균수를 45%까지 감소시킨다고 보고하였다. National Research Council(2004)의 연구에 따르면 Maryland 주의 서부해안선을 따라 수질이 20% 정도 개선되었을 때 서부해안의 beach의 가치가 188백만 달러, 수상 레저용 보트 관광이 26백만 달러, 배스(bass) 낚시가 8백만 달러 가치를 나타낸다고 평가하였다.

● 영양염류(인, 질소)와 유기탄소 및 질소의 생물퇴적(biodeposition)하는 효과

굴은 먹이를 섭취하면서 수중에 있는 인, 질소, 유기탄소, 유기질소 등을 고율로

흡수함으로서 부영양화의 영향을 최소화한다. 굴은 다량 섭취한 먹이를 분변(feces)과 덜 소화된 식물성플랑크톤 찌꺼기를 해저에 분비하고, 이것은 저서동물의 먹이가 되고, 동시에 저서미세조류, 저서대형조류, 수중수생식물(SAV)의 영양분이 된다. 영양염류 부하량과 탁도가 증가하는 것은 SAV의 서식지에 매우 큰 손상을 입히게 된다. Massachusetts 주의 Waquoit 만에서 질소 오염부하량이 3 tonN/km^2/yr이 되었을 때 SAV의 80~96%가 사라졌다. 마산만의 경우 토지이용과 저질용출에 의한 질소 오염부하량만 고려했을 때 약 32.5 tonN/km^2/yr가 되어 SAV가 서식할 수 없는 환경이다.

● 탈질효과(denitrification)

굴이 조류(algae)를 섭취했을 때 수중에 있는 질소는 분비물과 함께 생물퇴적물이 되어 저질층으로 옮겨지게 된다. 굴의 생물퇴적물에 의하여 무산소층(anoxic microzones)이 형성되면 토착 혐기성 미생물에 의하여 저질층내에서 유기질소가 암모니아로 분해되고 표층 저질층에서 연이어 질산화반응(nitrification)이 일어난다. 이후 저질층의 환경조건에 따라 일부의 질소는 조류에 재이용되는 경로로 수계(water column)로 다시 돌아가고 일부는 탈질 박테리아에 의하여 탈질반응이 일어나 질소가스로 변하여 대기로 방출된다. 이 반응은 굴에 의하여 생성되는 생물퇴적물이 탈질 박테리아가 활성화하는 표층 저질층에 무산소층을 형성하는 능력에 의하여 좌우된다. 굴 암초는 굴 암초가 없는 서식환경에 비하여 18~275% 큰 탈질반응을 나타내었고, 가장 큰 제거율은 저질층 위에 설치된 굴 암초에서 나타났다. 이 굴 암초의 탈질 능력은 수역의 영양염류 제거를 담당하고 있는 정책입안자들에게는 가장 매력적인 우선적 고려 대상이 되고 있다

● 탄소의 격리 제거(sequestration of carbon)

굴은 성장하는 과정에서 내내 수중의 이산화탄소를 격리 이용하여 탄산칼슘 패각을 생성한다. 패각이 해저의 혐기성상태에 놓이게 되면 산성물질에 의하여 빠르게 침식되어 녹게 되고, 그렇지 않은 것은 해저 바닥에 매몰되어 퇴적층 내에서 항구적으로 불활성한 상태로 있게 됨으로 굴은 온실가스인 이산화탄소를 탄산칼슘으로 만들어 대기로 방출되지 못하게 하는 생태계 역할을 항구적으로 감당하는 것이다.

굴을 채취한 후에 패각을 육지에 매몰하고 해양으로 돌려보내지 않는 것은 해양에서 탄산칼슘의 완충능력을 감소시키는 행위로서 바람직하지 못한 일이다.

● 다른 생물체의 서식지 제공(habitat provision)

굴 암초는 해양의 다른 생물들에게 서식지(habitat)와 먹이를 동시에 제공하는 매우 중요한 생태계 역할을 담당하고 있다. 굴 암초는 정주성인(resident) 생물뿐만 아니라 천이성(transient) 생물의 서식지가 되며, 또한 연안 해양에서 굴 암초는 비교적 단단한 재질로서 3차원 입체구조로 되어 있어서 조류(current)나 파도를 막아 조용하고 안정된 공간을 만들므로 유생이나 치어의 양육장도 되고 있다. 굴 암초는 표면이 거칠고 단단하므로 다른 부착성 생물의 서식지로 활용되고 있다. 그러므로 굴 암초는 연안 해양에서 풍부한 생물과 종다양성이 확보되는 곳이다. 굴 암초에는 어족자원이 풍부함으로 연안경제와 낚시레져 스포츠에 매우 중요한 가치를 가지고 있다.

● 해안선의 안정화와 침식 방지(shorelines stabilization and erosion reduction)

굴 암초는 해안으로 밀려오는 파도의 에너지 흡수, 선박의 운항(선박파도), 해수면 상승, 폭풍우 등에 의한 해안의 침식 방지, 갯벌의 누적(sediment accumulation)을 통하여 해안선을 보호하는 자연적인 연안 완충지대 역할을 하고 있다.

● 마산만 적용 예

약 4,000m^2(축구장 절반 크기)의 굴 암초(oyster reefs)는 1일 약 90톤의 물을 여과하고, 질소를 약 0.33kg 제거한다. 본 연구의 마산만의 총 해안선의 길이는 약 74.1km이다 이 해안선의 2/3에 폭 2m의 굴 암초를 세 겹으로 설치하면 총 면적은 296,400m^2가 된다. 이것은 하루에 약 6,669톤의 해수를 여과하고, 약 24kg의 질소를 제거하는 효과를 나타낼 수 있다.

굴 암초의 가장 뛰어난 수질정화효과는 부유물질과 질소 제거이다. 마산만은 연안에 인접한 도시 인구밀집지대로부터 부유물질과 질소 오염부하량이 집중적으로 유입하므로 마산만 해안선을 따라 굴 암초를 설치하는 것은 수질 및 수색 개선에 큰 효과를 나타낼 것으로 판단된다.

Ⅴ. 연구결과의 활용계획

마산만의 수질 및 수색을 회복하고 보전하기 위해서는 마산만 유역의 점 및 비점 오염부하량의 경감, 도심지역 오염물질의 유입 차단, 해양오염저질 처리, 마산만 주변의 미설치 하수관거 및 합류식 하수관거의 정비, 해역 수질(질소, 인) 개선 등의 사업을 수행해야한다. 본 연구의 결과는 이러한 사업을 계획하고 수행하는데 필요한 유용한 기술적 정보로 활용될 수 있다. 또한 마산만의 수질 및 수색을 지속적으로 관리하기 위하여 SWAT(유역모델), QUAL2E, WASP과 HEM3D(수질모델), EFDC와 MOHID(유동모델) 등의 컴퓨터 시뮬레이션 모델을 이용하여 계산을 수행하고 그 결과를 바탕으로 TMDL과 WLA를 실행하기 위한 유용한 수질모델을 구축하는데 입력 및 검정자료로 활용할 수 있다. 본 연구에서 사용한 조사방법과 자료 해석방법은 다른 유사한 내만을 조사하는데 원형(protocol)으로 활용될 수 있다.