

진해·마산만 오염부하량의 특성분석

Analysis on the Characteristics of the Pollutant Load in Chinhae-Masan Bay

조흥연* · 재장원*

Hong Yeon Cho* and Jang Won Chae*

要 旨 : 진해·마산만은 오염부하량의 측정자료가 미흡하기 때문에 오염부하량에 대한 정량적인 분석·평가 연구가 수행될 수 없었을 뿐만 아니라, 연안의 수질변화를 예측하는 수질모형의 다각적인 보정·검증작업이 제한적으로 이루어 질 수 밖에 없었다. 본 연구에서는 진해·마산만 22개 하천과 해양방류관을 통한 오염부하량을 측정하고, 해역내 3개 지점에서 오염물질 용출률을 측정하였다. 마산·창원 지역의 오염부하량은 진해·마산만 전체 오염부하량의 80~90% 정도를 차지하고 있으며, 해양방류관에 의한 오염부하량은 20~25%를 차지한다. 또한, 퇴적물로부터의 오염 부하량이 유역 오염부하량과 대등하기 때문에, 퇴적물로부터 용출되는 오염물질량은 하계 수질악화 및 동계 수질양호의 계절적인 변화를 결정하는 주요한 인자 중의 하나로 파악되었다.

핵심용어 : 진해·마산만, 오염부하량, 해양방류관, 오염물질 용출, 계절적 변화

Abstracts □ The quantitative analysis on the pollutants loads (PL) has hardly been carried out and calibration-verification process of the water quality modeling has been conducted under the restricted condition because the observed PL data are not sufficient. In this study, the PLs were measured at the 22 streams and the effluents site in the Masan-Changwon watersheds. The release rates from sediment were also measured at the three points in the Bay. The PLs from the Masan and Changwon cities and from multi-port diffuser (effluents discharge) amount to 80~90% and 20~25% of the PL in Chinhae-Masan Bay, respectively. As the amounts of the sediment released pollutants are the same order of the PLs from the watersheds, the pollutants released from the sediment is one of the main factors that might cause the seasonal variation of the water quality, which is degraded in summer and relatively good in winter.

Keywords : Chinhae-Masan Bay, pollutants loads, ocean multi-port diffuser, pollutants release, seasonal variation

1. 서 론

우리나라의 대표적 폐쇄성 해역인 진해·마산만은 대구(codfish)의 산란장이었으며, 굴, 홍합, 피조개 등의 중요한 양식장으로 수산활동이 활발한 해역이었다. 그러나, 1970년대 이후 도시화·산업화의 영향으로 수질오염이 심화되어, 적조가 빈번히 발생하고 이로 인한 패독(shell poisoning)현상까지 발생하면서 수산물의 생산량이 감소하였을뿐만 아니라 국민의 건강까지 위

협받고 있다. 이러한 오염에 대한 대책을 수립하기 위하여, 1976년부터 이 해역의 수질환경에 대한 물리·화학·생물학적 연구가 지속적으로 수행되어 왔다. 특히, 부영양화(eutrophication), 성층화(stratification), 빈산소층(hypoxia) 형성, 적조(red tide) 등의 현상파악을 위한 연구가 한국해양연구소, 국립수산진흥원, 경남대학교 등의 기관을 중심으로 수행되어 왔다. 마산·창원의 생활하수 및 공장폐수가 집중적으로 유입되고 있는 마산만의 수질개선을 위하여 오니준설(1990-1994)

*한국해양연구소 연안·항만공학연구센터 (Coastal and Harbor Engineering Research Center, Korea Ocean Research & Development Institute, Ansan P.O. Box. 29, Seoul 425-600, Korea)

및 하수처리장 건설(1993) 사업도 추진되었다. 그러나, 이러한 연구 및 수질개선 노력에도 불구하고, 급속한 인구증가와 산업화로 인한 지속적인 오염물질 유입 및 연안지역 개발사업의 영향으로 이 해역의 수질개선효과는 기대하기 어려운 상황이다.

기존의 관측이 해역내에서만 집중적으로 수행되었기 때문에, 해역내의 수질자료는 풍부한 반면 해역으로 유입되는 오염부하량 측정자료는 상대적으로 매우 부족한 실정이다. 따라서, 해역의 수질변동에 직접적으로 영향을 미치는 오염부하량에 대한 정량적인 분석·평가 연구가 수행될 수 없었을 뿐만 아니라, 연안의 수질변화를 예측하기 위한 수질모형(부영양화 모형)의 시기별, 지점별, 항목별 보정·검증작업이 제한적으로 이루어 질 수밖에 없었다.

본 연구에서는 진해·마산만 수질모형의 정확성·신뢰성 증진 및 모형의 보정·검증에 필요한 기초자료 및 정보를 제공하기 위하여, 진해·마산만 유역의 담수유입량·오염부하량에 대한 월별·계절별 관측 및 퇴적물로부터의 오염물질 용출률을 측정하고, 관측자료의 정성적·정량적 분석을 통하여 이 해역의 오염부하특성을 파악하였다.

2. 진해·마산만 오염부하량 측정

2.1 유역 오염부하량(pollutant loads)

진해·마산만(해역면적: 500 km², 유역면적: 1,000 km²)은 진해시, 마산시, 창원시, 고성군, 통영시, 거제시 유역을 포함하고 있으며, 유역에서 배출되는 담수 및 오염물질은 하천 및 해양방류관, 유역표면 등의 경로를 통하여 유입된다. 그러나, 우리나라 연안에 위치한 대부분의 소하천의 경우와 같이, 진해·마산만 유역에 위치한 소하천의 수위, 유량 및 수질에 대한 측정도 정기적으로 수행되고 있지 않다. 따라서, 진해만의 오염부하량은 발생부하량으로부터 추정하는 방법 또는 연 1~2회의 유량 및 농도측정자료로부터 계산하는 방법이 제한적으로 시도되어 왔다(이 등, 1980; 서, 1987; 강 등, 1989; 환경처, 1991; 이 등, 1991; 이·권, 1994; 양, 1994; 국립수산진흥원, 1995; 환경부, 1995). 특히, 진해만 유역 50여개의 소하천에 대해서는 유량 및 오염물질 농도관측이 하계에 집중적으로 수행된 바 있다(이 등, 1991-1991년 6월, 8월; 국립수산진흥원, 1995-1995년 6월, 7월). 그러나, 이와 같은 방법은 오염

부하량의 정도 파악에는 유용하지만, 불확실성이 크고 비교적 장기간의 계절적인 변동성을 고려할 수 없으며, 특정시기의 오염부하량이기 때문에 전체적인 크기 및 경향을 대표할 수 없는 단점이 있다(Di Toro and Connolly, 1980).

본 연구에서는 기존 오염부하량 추정방법의 불확실성을 최대한으로 줄이고, 오염부하량의 계절적 변동성을 검토하기 위하여 진해·마산만 유역의 22개의 하천에 대하여 월별 또는 계절별로 유량과 농도를 측정하여 오염부하량을 산정하였다. 오염이 심한 마산만 유역의 12개 하천(M1~M12)에 대해서는 1995년 6월부터 1996년 10월까지 월별측정을 수행하였으며, 진해만 유역의 10개 하천(J1~J10)에 대해서는 1995년 7월, 10월, 1996년 1월, 4월, 7월, 10월 등 계절별 측정을 수행하였다(측정지점 Fig. 1 참조). 또한, 마산시 덕동의 하수처리장에서 1차처리되어 해양(옥계해역)으로 배출되는 방류수의 오염부하량(해양방류관을 통한 오염부하량: M14)도 측정하였다(한국해양연구소, 1995, 1996).

- 마산만 유역: M1~M12(창원천, 남천, 내동천, 삼호천, 양덕천, 교방천, 회원천, 장군천 등)
- 진해만 유역: J1~J10(구이동천, 여좌천, 진동천, 진천천, 구산천, 마암천, 광도천, 고현천 등)

유역의 오염부하량을 측정하기 위하여 하천수가 해수와 혼합되기 전, 조사대상 하천의 최하류부에서 채수하였다. 하천의 유량은 단면 및 유속측정(유속계) 자료를 이용하여 산정하였으며, COD, SS, TN, TP 항목은 각각 KMnO₄ 방법(수질공정시험법), 여과 및 Gravimetric 방법(수질공정시험법), Ascorbic Acid 방법(Standard Method), 자외선 흡광광도법(수질공정시험법)을 사용하여 측정하였다(한국해양연구소, 1995 참조).

2.2 내부 오염부하량

해역으로 유입된 오염물질은 해수순환이 활발하지 못한 해역에서는 서서히 침전되어 저질을 오염시킨다. 하계에 수온이 상승하는 경우, 오염된 퇴적층에서 미생물에 의한 분해작용 및 화학반응 등으로 인하여 산소소비 및 오염물질용출이 활발하게 수행된다(Bowie et al., 1985). 특히, 저질의 오염이 심각한 해역에서는 상당량의 오염물질이 저층에서 용출될 수 있으므로, 유역에서 유입되는 오염물질을 완전차단한 경우라 할 지라도 해역의 수질개선 효과가 미미할 수도 있다. 따라서, 해역내부에서의 오염물질 용출량에 대한 정량적

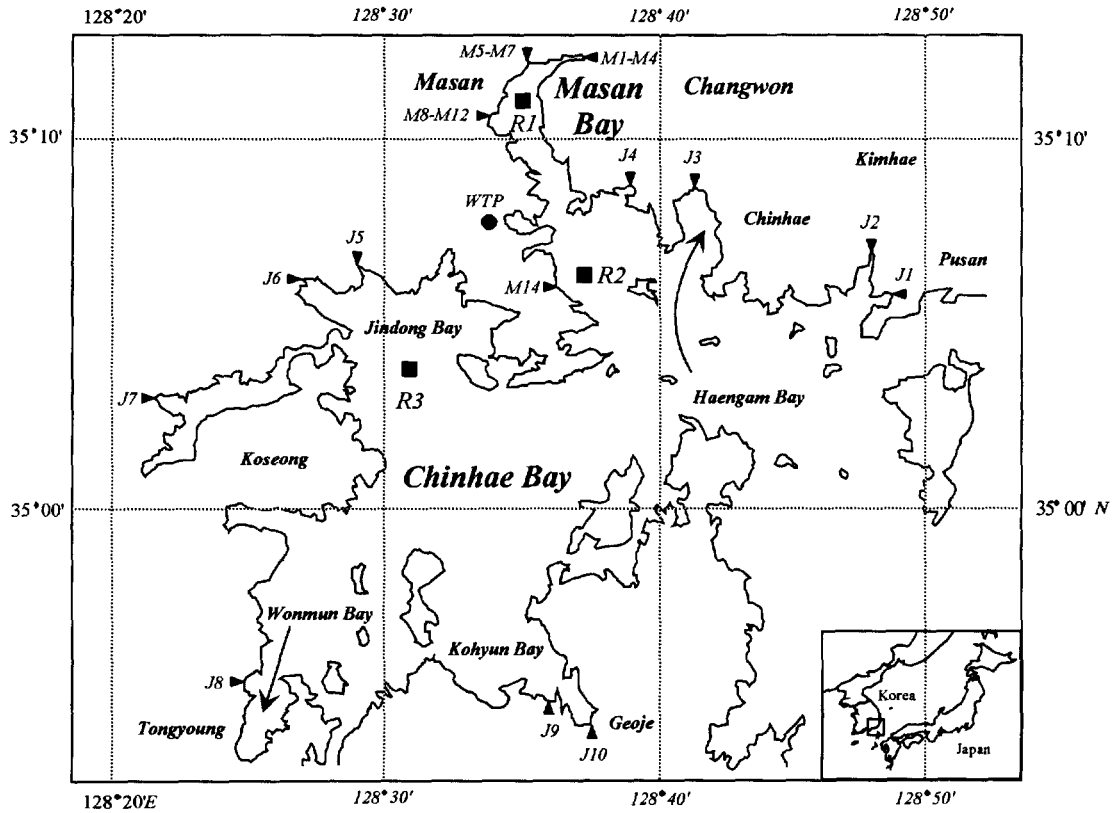


Fig. 1. Sampling stations of the pollutant loads and release rates in Chinhae-Masan Bay.

인 분석이 오염이 지속된 해역에서는 매우 중요하다. 본 연구에서는 진해·마산만내 3개 지점(R1~R3)을 선정하여 퇴적물 산소소비량(Sediment Oxygen Demand; SOD), 오염물질 용출량 등을 측정하였다(Fig. 1참조). 또한, 측정된 내부 오염부하량 자료로부터 이 해역의 오염물질 용출효과를 정량적으로 분석하였다.

SOD 및 오염물질 용출량 측정은 표준화된 방법이 없는 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 내부 오염부하량 측정기구(Bowman and Delfino 개발; 구성요소 - chamber, sealer, pump, probe, recorder)를 제작하여 측정하였다(한국해양연구소, 1996).

3. 진해·마산만 오염부하량 특성분석

진해·마산만의 오염부하량 특성을 효율적으로 파악하기 위하여, 전체 유역을 다음과 같이 구분하였다.

- 마산만(마산): 마산시 유역(하수차집관거 -> 하수처리장 이동량 제외)

- 마산만(창원): 창원시 유역(하수차집관거 -> 하수처리장 이동량 제외)

- 진해만: 마산만·행암만 유역을 제외한 유역

- 행암만: 진해시 유역(행암만으로 유입되는 영역만 포함)

- 해양방류관을 통한 오염물질 방류해역: 창원·마산시의 생활하수 및 공장폐수

구분된 각 영역에 대하여 측정된 담수유입량 및 오염부하량의 특성을 분석하였다. 여기서, 담수유입량 및 오염부하량 측정자료는 계절별로 평균한 자료이며, 봄, 여름, 가을, 겨울은 각각 3월~5월, 6월~8월, 9월~11월, 12월~2월의 기간에 해당한다.

3.1 담수 유입량

진해·마산만 유역의 담수는 강수에 의한 유출성분 및 낙동강 수계에서 공급되는 용수성분으로, 하천 또는 하수도 -> 하수종말처리장 -> 해양방류관을 통하여 해역으로 유입된다. 측정기간(1995~1996)의 진해·

Table 1. Seasonal freshwater inflows to Chinhae-Masan Bay (Ton/day)

담수 유입량	'95 여름	'95 가을	'95 겨울	'96 봄	'96 여름	'96 가을	연평균유입량
마산만(마산)	424,400	193,000	283,600	*649,300	278,400	273,400	379,400
마산만(창원)	388,300	256,600	121,700	307,700	590,600	197,000	286,400
해양 방류관	195,300	199,000	180,700	202,900	235,300	217,200	201,800
행 암 만	103,200	38,600	12,000	79,800	288,100	64,200	84,700
진 해 만	*2,317,000	92,600	15,400	166,700	151,400	83,900	376,100
합 계	3,428,200	779,200	613,400	1,406,400	1,543,800	835,700	1,328,400

참고: 연평균 담수유입량=(봄담수유입량+여름평균담수유입량+가을평균담수유입량+겨울담수유입량)/4.0

마산만 연평균 일일 담수유입량은 1,328,400톤으로, 마산·창원 유역의 담수유입량이 약 50%(665,800톤), 해양방류관을 통한 유입량은 약 15%, 행암만 담수유입량이 약 7%, 진해만 유역의 담수유입량이 약 28%를 차지하고 있다(Table 1참조). 해양방류관을 통한 담수유입량은 하수처리장의 시설용량과 관련된 값으로, 계절변화가 크지 않으며 처리용량 250,000톤/일이 한계값에 해당한다. 한편, 강우가 집중되는 하계의 진해만 담수유입량은 연도별로 뿐만 아니라(참고: 1991년 501,500(T/day)(이 등, 1991), 1995년 2,317,000(T/day), 1996년 151,400(T/day)), 계절별로도 큰 차이가 있다. 또한, 국립수산진흥원(1995)에서 측정한 진해만 유역의 1995년 6월 담수유입량은 2,200,000(T/day), 7월 담수유입량은 1,450,000(T/day)으로 근접한 측정시기에도 큰 편차를 보이고 있음을 알 수 있다. 반면, 마산만의 담수유입량은 진해만 유역에 비하면 계절별 차이가 크지 않으며, 이는 평상시(무강우시)의 하천유출이 도시 및 공장유역 용수사용량의 영향을 받기 때문이다(조·채, 1997). 진해·마산만의 담수유입량은 여름철에는 크고, 겨울철에는 작은 전형적인 계절성을 보이고 있다. 그러나, 측정시기가 강우시기 또는 강우의 효과가 지속되는 시기에 해당하는 경우에는 측정 담수유입량이 매우 크게 나오는 경우('95 여름 진해만, '96 봄 마산만)도 있다.

3.2 유역 오염부하량

진해·마산만의 오염부하 특성은 해역의 오염도 파악에 범용적으로 사용되는 COD, SS, TN, TP 항목에 대하여 분석하였다.

3.2.1 COD 오염부하량(kg/day)

대표적 오염물질에 해당하는 유기물(COD) 오염부하량은 계절적으로 뚜렷한 양상을 보이지 않고 있다. 반면, 영역별로는 마산유역, 창원유역, 해양방류관에 의한 오염부하량이 대등한 정도로, 각각 33%, 24%, 27%를 차지하고 있다. 전체 오염부하량의 약 84%(75,400)가 마산·창원시에서 발생·부하되고 있으며, 행암만 유역 및 진해만 유역의 오염부하량은 각각 6%, 10%에 불과하다. 진해만 유역의 COD 오염부하량은 마산만 유역의 약 1/10 정도이다(Table 2참조).

3.2.2 SS(부유물질) 오염부하량(kg/day)

부유물질은 해역의 투명도(탁도)와 밀접한 관련이 있는 중요한 항목이다. SS 항목의 오염부하량도 계절적으로는 COD 항목과 마찬가지로 뚜렷한 계절적 변화양상은 보이지 않는다. 영역별 오염부하량은 마산유역 40%, 창원 유역 30%, 해양방류관 18%로, 이는 전체 오염부하량의 88%(50,300)를 차지하고 있다. 반면, 행암만 및 진해만 유역의 오염부하량은 각각 전체 오염부하량의 약 5%, 7%를 차지하고 있다(Table 3참조).

3.2.3 TN(총질소) 오염부하량(kg/day)

Table 2. Seasonal COD loads to Chinhae-Masan Bay (kg/day)

COD 부하량	'95 여름	'95 가을	'95 겨울	'96 봄	'96 여름	'96 가을	연평균부하량
마산만(마산)	34,500	16,000	26,600	*40,300	19,200	30,800	29,300
마산만(창원)	35,200	18,800	11,400	28,000	18,500	22,300	21,700
해양 방류관	23,600	40,300	13,500	21,300	33,400	28,200	24,400
행 암 만	3,800	4,063	2,200	7,000	12,300	6,700	5,700
진 해 만	*33,400	9,400	800	7,700	2,300	7,100	8,700
합 계	130,500	88,600	54,500	104,300	85,700	95,100	89,800

참고: 연평균 오염부하량=(봄오염부하량+여름평균오염부하량+가을평균오염부하량+겨울오염부하량)/4.0

Table 3. Seasonal SS loads to Chinhae-Masan Bay (kg/day)

SS 부하량	'95 여름	'95 가을	'95 겨울	'96 봄	'96 여름	'96 가을	연평균부하량
마산만(마산)	15,300	5,900	18,500	*57,800	7,200	9,000	22,700
마산만(창원)	45,300	6,300	8,200	27,700	10,700	4,000	17,300
해양 방류관	8,200	11,500	7,600	12,300	10,800	12,200	10,300
행 압 만	5,300	1,300	300	4,100	2,400	2,500	2,500
진 해 만	*23,000	900	300	1,300	1,900	2,700	4,000
합 계	97,100	25,900	34,900	103,200	33,000	30,400	56,800

참고: 연평균 오염부하량=(봄오염부하량+여름평균오염부하량+가을평균오염부하량+겨울오염부하량)/4.0

Table 4. Seasonal TN loads to Chinhae-Masan Bay (kg/day)

TN 부하량	'95 여름	'95 가을	'95 겨울	'96 봄	'96 여름	'96 가을	연평균부하량
마산만(마산)	9,000	5,200	15,000	*14,000	6,800	10,100	11,100
마산만(창원)	8,100	13,300	5,900	7,000	9,500	7,600	8,000
해양 방류관	7,700	9,800	6,700	7,600	8,900	4,400	7,400
행 압 만	700	700	600	2,700	900	2,500	1,400
진 해 만	*6,600	700	600	1,600	400	2,700	1,800
합 계	32,100	29,700	28,800	32,900	26,500	27,300	29,700

참고: 연평균 오염부하량=(봄오염부하량+여름평균오염부하량+가을평균오염부하량+겨울오염부하량)/4.0

총질소 항목은 총인 항목과 함께 해역의 부영양화를 유발하는 영양염류이다. 총질소 항목의 진해·마산만 유역 오염부하량은 계절별로 편차가 크다. 영역별 총질소 오염부하량은 마산유역 37%, 창원 유역 27%, 해양방류관 25%로, 이는 전체 오염부하량의 89%(26,500)를 차지하고 있다. 반면, 행암만 및 진해만 유역의 오염부하량은 각각 전체 오염부하량의 약 5%, 6%를 차지한다 (Table 4참조).

3.2.4 TP(총인) 오염부하량(kg/day)

총인 항목은 해역의 부영양화를 유발하는 중요한 항목이며, 진해·마산만 해역의 조류(algae)성장 제한인자에 해당한다(한국해양연구소, 1995, 1996). 총인 항목은 봄·여름철의 오염부하량이 가을·겨울철의 오염부하량보다 약 1,000(kg/day) 정도 큰 값을 보이고 있다. 그러나, 영역별 오염부하량은 계절적인 특성을

보이고 있지 않다. 영역별 총인 오염부하량은 마산유역 30%, 창원 유역 22%, 해양방류관 26%로, 전체 오염부하량의 79%(1,760)를 차지하고 있다. 반면, 행암만 및 진해만 유역의 오염부하량은 각각 전체 오염부하량의 약 11%, 10%를 차지하고 있다(Table 5참조).

3.2.5 오염물질 항목별 오염부하 특성

마산·창원유역 및 해양방류관 유역의 오염부하량의 비율(총 오염부하량 대비)은 TN(89%), SS(88%), COD(84%), TP(79%) 항목 순으로 나타났으며, 담수유입량의 비율은 65% 정도를 차지하고 있는 것으로 파악되었다. 담수 유입량 비율에 비하여 오염부하량의 비율이 크게 나타나는 이유는 마산만으로 유입되는 담수가 진해만으로 유입되는 담수보다 많이 오염되어 있기 때문으로 사료된다. 전반적으로, 오염부하량의 계절적인 특성은 명확하게 나타나지 않았으며, 이는 월

Table 5. Seasonal TP loads to Chinhae-Masan Bay (kg/day)

TP 부하량	'95 여름	'95 가을	'95 겨울	'96 봄	'96 여름	'96 가을	연평균부하량
마산만(마산)	620	270	840	*980	470	440	680
마산만(창원)	650	460	340	600	660	310	500
해양 방류관	500	530	470	590	980	510	580
행 압 만	90	120	60	490	370	260	240
진 해 만	*900	40	40	230	60	270	230
합 계	2,760	1,420	1,750	2,890	2,540	1,790	2,230

참고: 연평균 오염부하량=(봄오염부하량+여름평균오염부하량+가을평균오염부하량+겨울오염부하량)/4.0

별 또는 계절별 관측에 의한 담수유입량 및 오염부하량 추정이 계절적인 유출특성을 적절하게 반영하고 있지 못하다.

담수유입량과 오염부하량의 상관관계 분석을 수행한 결과, COD, SS 오염부하량은 담수유입량과 상관성(상관계수 0.71~0.72)이 있는 것으로 파악되었으며, TN, TP 오염부하량은 담수유입량과의 상관성(상관계수 0.52~0.59)이 비교적 낮은 것으로 파악되었다(Fig. 2~ Fig. 5참조). COD, SS, TN, TP 부하량에 유역유출량 및 인구가 기여하는 비율이 유사할 것으로 사료되며, 토지이용도가 높은 경우에는 TN, TP 항목과 유역유출량과의 상관성이 높을 것으로 예상된다. 따라서, TN, TP 항목의 오염부하량 및 담수유입량과의 상관관계 분석은 인구, 토지이용도, 대기중의 질소화합물 및 SS 농도 등의 인자를 고려한 관측 및 연구가 보완되어야 할 것으로 사료된다. 상관관계 분석과정에서 진해만

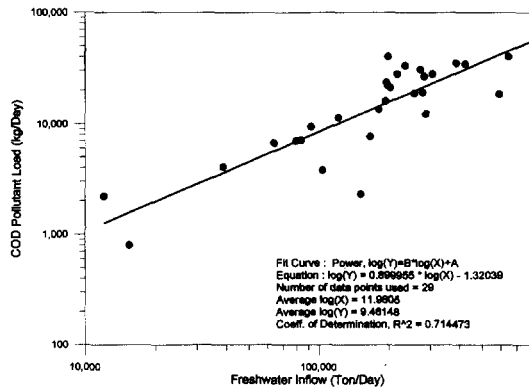


Fig. 2. Correlation diagram between freshwater inflows and COD loads.

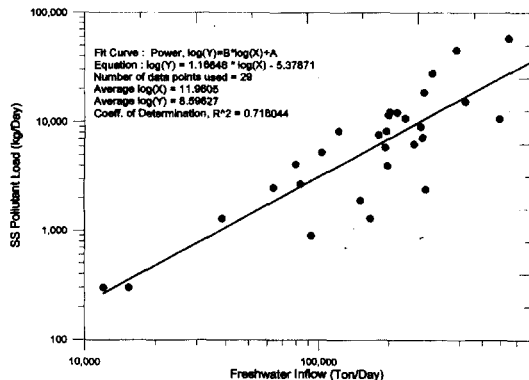


Fig. 3. Correlation diagram between freshwater inflows and SS loads.

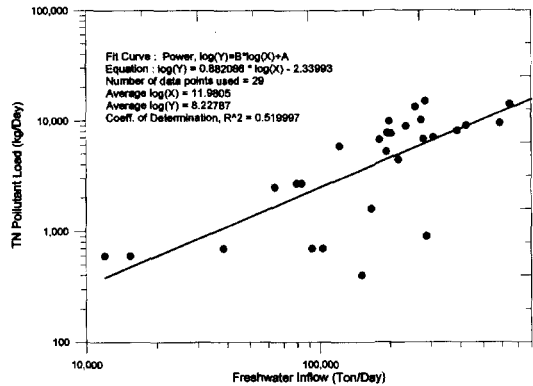


Fig. 4. Correlation diagram between freshwater inflows and TN loads.

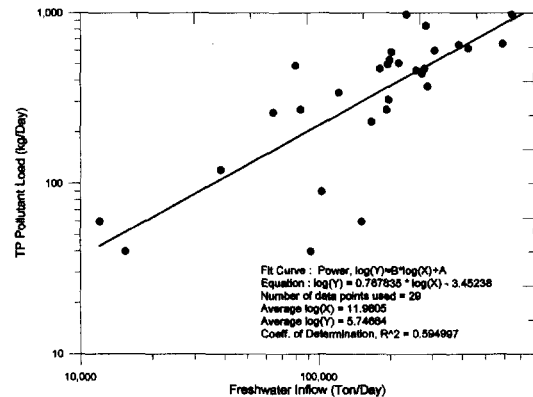


Fig. 5. Correlation diagram between freshwater inflows and TP loads.

유역의 1995년 여름 자료는 제외(이상점으로 간주)하였으며, 집중호우 및 홍수시의 담수유입량 규모에서의 상관관계 분석은 가용자료가 없어 수행하지 못하였다.

단기간에 걸친 다량의 담수 및 오염물질 유출량을 추정하기 위해서는 강우·유출모형 및 비점오염원 모형의 구성과 강우시 연속적인 수량·수질자료의 관측·분석이 필요하다. 강우시의 유량 및 오염부하량은 시시각각 변동하므로, 현재의 간헐적인 오염부하량 자료로는 이에 대한 분석이 불가능한 실정이다. 따라서, 본 연구에서 분석하는 자료는 강우효과가 적은 평상시의 담수유입량 및 오염부하량으로 간주할 수 있다. 한편, 월별관측 또는 비교적 자료가 많은 마산만 유역에 비하여, 계절별 1회 측정자료를 이용하여 진해만의 오염부하량에 대한 통계분석을 수행하는 것은 다소 무리가 있는 것으로 사료된다. 따라서, 보다 신뢰성있는 통계분석을 위해서는 진해만 유역의 자료보강이 요구된

다. 그러나, 하계에만 수행된 기존의 진해만 오염부하량 측정성적에 비하여, 계절별 측정을 수행한 본 연구의 관측은 진실보한 자료로 판단된다.

3.3 내부 오염부하량(저면퇴적물로부터의 오염부하량)

돌섬, 해양방류구 및 진동만(Fig.1 R1~R3 지점 참조)에서 저면 퇴적물로부터의 SOD 및 COD, NH₃-N, PO₄-P 항목의 용출률을 측정하였다(Table 6참조). 해양방류구 및 돌섬을 포함한 부도 북부해역(표면적: 약 70 km²)의 내부 오염부하량을 산정(오염부하량=해역 표면적 · [돌섬 및 해양방류구의 평균 오염물질 용출률])하면, COD, NH₃-N, PO₄-P 항목의 오염부하량은 각각 18,400(kg/day), 6,400(kg/day), 930(kg/day)이 된다. 또한, 진해만의 내부오염부하량을 산정하기 위하여, 진해만에 산재한 양식장에서의 내부오염부하량을 진동만에서 측정한 값이 대표한다고 가정하였다. 진해만의 양식장 해역(표면적 100 km²; 한국해양연구소, 1995)의 오염부하량을 산정(오염부하량=해역표면적 · [진동만 오염물질 용출률])하면, COD, NH₃-N, PO₄-P 항목의 오염부하량은 각각 21,700(kg/day), 6,200(kg/day), 800(kg/day)이 된다. 따라서, 진해·마산만 해역의 저면퇴적물로부터의 오염부하량을 유역평균 오염부하량에 대한 비율로 나타내면, COD, 총질소(NH₃-N), 총인(PO₄-P)의 경우 각각 45%, 200%, 78%로, 유역의 오염부하량에 비하면 COD 부하는 약 1/2배, TN 부하는 약 2배에 해당한다. 한편, 진해만의 오염물질 용출부하량은 양식장이 산재한 영역과 양식장이 없는 진해만 중앙부와는 서로 다른 수치를 보일 것으로 사료되는 바, 진해만 중앙부에 대한 용출실험 및 진해만에 산재한 주요 양식장에서도 용출실험을 수행하여 내부 오염부하량에 대한 자료의 축적이 필요하다.

오염물질 용출률은 온도에 민감한 값으로, 일반적인 수질모형에서는 온도의 함수로 표현된다.

$$R(T) = R(20) \theta_r^{(T-20)}$$

여기서, R(T)=오염물질 용출률(수온 T°C), R(20)=오염

Table 6. Pollutants release rates from the contaminated sediment (mg/m²/day)

지 점	COD	NH ₃ -N	PO ₄ -P	SOD	관측시기
돌섬(마산만)	292	132	16.5	0.958	실험실 분석 (95 여름)
해양 방류구	235	51	10.2	0.780	
진 동 만	217	62	8.0	0.630	

물질 용출률(수온 20°C), θ_r =온도보정계수(1.0~1.1)이다. 온도가 20°C 이상 상승하는 경우에는 용출률이 증가하고, 온도가 하강하는 경우에는 용출률이 서서히 감소하며, 약 5°C 이하의 조건에서는 오염물질 용출률이 0(zero)이 된다(Bowie *et al.*, 1986). 따라서, 하계의 수질악화 및 동계의 수질양호 등의 계절적 변화는 오염물질 용출률 변화와 직접적으로 관련되어 있는 것으로 판단된다.

4. 하수종말처리장에 의한 오염부하량 저감효과

마산시 덕동 하수종말처리장(Fig. 1: WTP)은 최대 약 250,000톤/일의 하수(마산·창원 유역의 생활하수 및 공장폐수)를 처리할 수 있으며, 이로 인한 마산만의 유역 오염부하량 저감효과를 정량적으로 분석하였다. 효과분석은 1995~1996년 하수종말처리장의 일일 유입량 및 수질항목농도 자료를 이용하여 처리 전·후의 오염부하량 및 저감 오염부하량을 계산하고, 저감된 오염부하량과 유역의 오염부하량의 양적 비교과정을 통하여 수행하였다.

일별로 계산된 하·폐수의 유입·유출 오염부하량 및 저감 오염부하량은 본 연구에서 측정한 오염부하량 자료와의 효율적인 비교를 위하여, 계절별 평균치를 이용하였다(Table 7참조).

하수처리장의 오염물질별 처리효율은 SS 항목 40% 내외, COD 항목 20% 내외, TN 항목 20% 내외, TP 항목 10% 내외로 계산되었다. 하수처리장 자료를 이용하여 계산한 평균 오염부하량(COD: 5,500, SS: 8,600, TN: 8,000, TP: 350)은 TN 항목의 오염부하량을 제외하고는 관측에 의한 하수방류관의 오염부하량(COD: 24,400, SS: 10,300, TN: 7,400, TP: 580)에 비하여 전반적으로 낮은 값을 보이고 있다. 특히, COD, TP 항목의 경우, 큰 차이를 보이고 있다. 이에 대해서는 추후 세밀한 검토가 필요할 것으로 사료된다. 한편, 진해·마산만 총 오염부하량에 대한 하수처리장 저감부하량의 비율은 COD, SS, TN, TP 항목의 경우, 각각 1.6%, 10.4%, 6.1%, 2.2%이다. 따라서, 하수처리장의 오염부하량 저감효과(전처리과정에서의 저감효과는 제외)는 SS 항목을 제외하고는 뚜렷한 효과는 보이고 있지 않으며, 처리효율의 증진없이도 오염부하량의 저감효과는 기대할 수 없다. 단지 마산만으로 유입되는 오염물질을 해양방류해역(옥계해역)으로 이동·배출하는 효

Table 7. Input and output of pollutant loads from the WTP

하수처리장		'95 여름	'95 가을	'95 겨울	'96 봄	'96 여름	'96 가을
하·폐수량(Ton/day)		195,400	196,600	186,000	205,100	232,500	218,100
유입부하량 (kg/day)	COD	7,100	7,300	7,000	7,300	6,900	6,300
	SS	13,300	13,000	12,700	15,500	18,900	14,100
	TN	-	-	8,300	9,100	11,400	10,200
	TP	-	-	390	460	400	360
유출부하량 (kg/day)	COD	5,200	5,200	6,000	5,900	5,500	5,000
	SS	7,200	8,100	8,200	9,400	10,600	7,700
	TN	-	-	7,800	7,200	8,800	8,100
	TP	-	-	350	410	330	320
저감부하량 (kg/day)	COD	1,900	2,100	1,000	1,400	1,400	1,300
	SS	6,100	4,900	4,500	6,100	8,300	6,400
	TN	-	-	500	1,900	2,600	2,100
	TP	-	-	40	50	70	40
처리효율(%)	COD	27	29	14	19	20	21
	SS	46	38	35	39	44	45
	TN	-	-	6	21	23	21
	TP	-	-	10	11	18	11

과판을 기대할 수 있다고 사료된다.

5. 결론 및 토의

진해·마산만 오염부하량의 특성은 다음과 같다.

- 관측된 담수유입량은 계절적인 특성을 나타내는 반면, 오염부하량의 경우는 나타나지 않았다. 한편, COD, SS 항목의 오염부하량과 담수유입량과의 상관성은 크며, TN, TP 항목의 오염부하량과 담수유입량과의 상관성은 작다.
 - 마산·창원 지역의 오염부하량은 진해·마산만 전체 오염부하량의 80~90% 정도를 차지하고 있으며, 해양방류관에 의한 오염부하량은 이 중 20~25%를 차지하고 있다.
 - 오염된 퇴적물로부터의 오염물질 부하는 하계 수질 악화 및 동계 수질악화의 계절적인 변화를 결정하는 주요한 인자 중의 하나로 파악되었으며, 오염물질 용출부하량도 지역 오염부하량과 대등한 양으로 파악되었다.
 - 해양방류관에 의한 오염부하량 저감효과는 SS 항목을 제외하고는 미미한 정도로 파악되었으며, N, P 등의 처리를 위한 2, 3차 처리시설 및 처리용량의 확장이 요구된다.
- 보다 정확하고, 신뢰성있는 오염부하량을 추정하기

위해서는 시간 또는 일단위의 유량 및 농도를 지속적으로 측정하여 추정하여야 한다. 그러나, 수자원 관리 측면에서 중요성이 적은 소하천에 측정장치를 설치·운영하는 문제는 현 상황에서는 실현가능성이 적다고 판단된다. 따라서, 일시적인 단기간(시간 또는 일 단위)의 자료를 이용하여 강우·유출모형 및 오염부하량 추정모형(비점오염원 모형)을 수립·보정·검증하고, 구축된 모형을 이용하여 적절한 강우 및 오염부하량을 수치모의하는 방법이 효율적일 것으로 판단된다.

한편, 진해·마산만의 수질개선방안을 오염부하량(유해독성물질 및 중금속 항목은 제외) 저감차원에서 접근·모색하는 경우, 현재 진행되고 있는 마산시 덕동의 하수처리장 증축(처리효율 증진 및 처리용량 증대)이 시급한 것으로 파악된다. 또한, 진해만에 위치한 양식장의 오염물질 용출 억제방안, 마산만의 오염물질 억제방안이 단계적으로 추진되어야 할 것이다.

사 사

본 논문은 연안역 이용 및 통합관리를 위한 연구(1995~1996)의 일환으로 수행된 진해·마산만 수질환경 관리모델 개발연구(1997~1999) 결과의 일부이며, 이 연구사업에 참여한 연구원과 오염부하량 관측을 수행한 경남대학교 환경문제연구소 이찬원 교수팀

에게 감사드린다.

참고문헌

- 강시환 등, 1989. 마산만의 오염물질 확산모델, 연안환경 보전기술 개발연구, BSPG 00083-242-4, 한국과학기술연구원 해양연구소, 과학기술처.
- 국립수산진흥원, 1995. 해양환경 관리기술 : 부영양화 및 적조현상 구명에 관한 연구, 제3차년도 최종보고서, 환경부, 과학기술처.
- 서윤수, 1987. 마산만의 오염물질 부하와 대책, 적조현상과 어장보전, 국립수산진흥원, pp. 19-26.
- 양기섭, 1994. 마산만 수질에 영향을 미치는 유입오염부하 특성, 경남대학교 대학원, 석사학위논문.
- 이광우, 남기수, 허형택, 1980. 진해만의 적조 및 오염모니터링 시스템 개발을 위한 기초연구, 제1차년도 보고서, BSPE 00022-43-7, 한국과학기술연구소 부설 해양개발연구소.
- 이찬원 등, 1991. 진해만 일원 오염실태 조사보고서, 경남대학교, 환경처.
- 이찬원, 권영택, 1994. 마산만 준설에 따른 해양환경 종합 모니터링, 경상남도.
- 조홍연, 채장원, 1997. 마산만의 장기간 물수지 및 해수교환 특성, 한국해양 · 해양공학회지, 9(2): 74-85.
- 한국해양연구소, 1995. 연안역 이용 및 통합관리를 위한 연구(I), 제 1차년도 보고서, BSPN 00322-968-7, 과학기술처.
- 한국해양연구소, 1996. 연안역 이용 및 통합관리를 위한 연구(II · III), 제2 · 3차년도 보고서, BSPN 00260-807-6, 과학기술처.
- 한국해양연구소, 1997. 해양오염방제 및 환경회복기술 : 연안환경 개선기술, 제 3장, 제 2단계, 제 2차년도 연차보고서, BSPN 96343-00-1013-2, 환경부.
- 한국해양연구소, 1997. 해양오염방제 및 환경회복기술 : 연안환경 개선기술, 제 5장, 제 2단계, 제 1차년도 연차보고서, BSPN 00307-949-2, 환경부, 과학기술처.
- 환경부, 1995. 해양오염측정망 운영지침, 정부간행물등록번호 12000-67441-67-9508.
- 환경처, 1991. 해양환경보전편람, pp. 41-49.
- Bowie, G.L., Mills, W.B., Porcella, D.B., Campbell, C.L., Pagenkopf, J.R., Rupp, G.L., Johnson, K.M., Chan, P. W.H. and Gherini, S.A., 1985, Rates, Constants, and Kinetics Formulations in Surface Water Quality Modeling (2nd Ed.), US EPA.
- Di Toro D.M. and Connolly, J.P., 1980. *Mathematical Models of Water Quality in Large Lakes, Part 2 : Lake Erie*, EPA 600/3-80-065. US EPA.