

## 제주도 항만의 수질 특성 및 예측

조은일·박청길\*

제주대학교 환경공학과, \*부경대학교 환경공학과

### The Characteristics and Estimation of Water Quality at the Harbors of Cheju Island

Eun-Il Cho and Chung-Kil Park\*

*Dept. of Environmental Engineering, Cheju National University, Cheju-do 690-756, Korea*

*\*Dept. of Environmental Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-737, Korea*

The purpose of this study was to investigate the characteristics of water quality from August, 1996 to May, 1997 and the water quality for future was estimated at the harbors of Cheju Island. Comparing the mean concentrations of each water quality with the criterion of water quality in ocean are as follows : 1) COD concentration was the highest at Cheju Harbor and was under III class but it was under II class at the other harbors. 2) T-N concentration was under III class except for Songsan Harbor. 3) T-P concentration was under III class at all harbors.

The results of estimating water quality concentration for the future at Cheju Harbor and Sogwi Harbor are as follows : 1) for Cheju Harbor, 2.592mg/l of COD, 0.246mg/l of T-N and 0.021mg/l of T-P in 1996 was estimated to decrease to 2.572mg/l, 0.244mg/l and 0.020mg/l in 2020, respectively. 2) for Sogwi Harbor, 1.485mg/l of COD, 0.223mg/l of T-N and 0.023mg/l of T-P in 1996 was estimated to decrease to 1.451mg/l, 0.221mg/l and 0.022mg/l, in 2020, respectively. The estimated slow decrease rate in the concentration of all items was considered that the portion of stream loadings is very small comparing with the transport volume by oceans currents.

**Key Words:** water quality, criterion, Cheju Harbor, Sogwi Harbor, Cheju Island

### 서론

제주도는 사면이 바다로 둘러 쌓여 있으며 수려한 자연환경이 잘 보전된 지역으로 전국에서 최상의 관광지역으로 알려져 있다. 제주도의 연안해양 환경은 해안에 큰 만이 없이 단조로운 편이며 연안에는 제주항, 서귀항, 성산항, 한림항, 화순항 및 모

슬포항과 크고 작은 107개의 어항이 있으나 전체의 85%가 어항이라기 보다는 포구라 할 수 있을 정도로 좁고 수심이 얕으며 방파제가 미약한 소규모 어항으로 되어 있고 주위에는 62(유인도 8개)의 도서(島嶼)가 산재해 있다(환경처, 1991). 제주도의 연안해양은 한·난류가 교차되는 해역으로서 각종 어·패·조류의 산란장 및 생육장으로서 적합한 환경조건을 갖추고 있으며 특히 우리 나라에서 인구

밀도가 가장 적고 수질오염을 유발시키는 대규모 공장이 없을 뿐만 아니라 외해와 접하는 개방된 연안으로 인해 오염수의 교환율이 크기 때문에 수질은 전국에서 가장 양호한 것으로 평가되고 있으나 최근 들어 인구의 도시집중화, 산업화, 관광인구의 증가, 소비의 다양화와 다량화, 해산물동량의 증가 및 각종 해안개발 등으로 제주연안 해양환경오염이 급속도로 증가되는 추세에 있다(濟州道, 1994; 제주도, 1997).

제주도내 주요항만으로 제주항, 서귀항, 성산항 그리고 한림항을 들 수 있으며 이 항만들은 대부분 선박운항으로 발생하는 폐유, 선박생활오수, 화물부스러기 그리고 주변지역에서 발생하는 미처리된 생활오수 등으로 인해 항내 수질이 악화되고 있는 실정이며 우리 나라 환경부에서도 이 들 해역 수질 등급을 III등급으로 정해놓고 있다(國立環境研究院, 1991; 환경부, 1996).

따라서 본 연구는 제주도 연안에서 대표되는 동서남북의 주요항만(북:제주항, 남:서귀항, 동:성산항, 서:한림항)에서 해양수질 환경특성을 조사하고 제주항과 서귀항을 대상으로 장래의 수질변화를 예측하는데 목적이 있다.

## 재료 및 방법

### 수질조사

제주도내 항만의 해양수질 현황을 파악하기 위하여 Fig. 1~Fig. 4와 같이 제주항, 서귀항, 성산항 그리고 한림항의 항내 4~5지점을 선정하여 육상오염부하가 많이 유출되는 낙조시를 선정하여 조사하였다.

해역환경 현황조사시기는 계절별로 나누어 총 4회 조사하였으며 1회는 1996년 8월 27일부터 9월 1일, 2회는 11월 22일부터 24일, 3회는 1997년 2월 12일부터 13일 그리고 4회 조사는 1997년 5월 4일부터 5일까지 현장조사를 실시하였다.

수질조사항목은 pH, 용존산소(DO), 화학적산소요구량(COD), 부유물질(SS), 총질소, 총인 그리고

염분을 조사하였다. 수질분석방법은 수질오염공정시험법과 Standard methods에 의했다.

### 장래의 항만 수질변화 예측

해역수질변화를 예측하기 위해 제주도내 항만에서 오염정도가 심한 제주시에 위치하고 있는 제주항과 서귀포시에 위치하고 있는 서귀항을 연구대상 지역으로 선정하였다 그리고 수질 예측항목은 해역에서 유기오염의 일반지표인 화학적산소요구량(COD)과 해역의 부영양화에 관계되는 총질소(T-N)와 총인(T-P)을 선정하였으며 장래 항만수질 변화예측은 현재(1996년)와 단기(2001년), 중기(2010년) 그리고 장기(2020년)에 대하여 예측하였다.

예측방법은 우선 해수유동모델을 이용하여 해수의 유동장을 시뮬레이션하고 그 유동결과를 이용하여 항만 수질변화를 예측하였다.

### 해수유동 시뮬레이션

대상해역의 해수유동장을 시뮬레이션하기 위해서 이용된 수치모델은 3차원 다층모델을 이용하였다(日本通商産業省, 1986). 이 모델은 여러 연구자들에 의해 국내의 만을 대상으로 적용성이 검토된 모델이다(최 등, 1994; 김 등, 1994; 김 등, 1995; 김 등, 1996; 조, 1996; 조, 1996). 제주항과 서귀항의 해수유동장을 시뮬레이션하기 위해 우선 제주도 주변의 광역 해역을 대상으로 조류를 파악하였고 계산된 각 항 주변의 자료(조위, 위상차 등)를 이용하여 각 항에 대한 모델을 시뮬레이션 하였다. 여기서 해수유동을 재현하기 위해 경계에서의 조위는 반일주조성분인  $M_2$ 분조를 사용하였으며 바람의 영향은 없는 것으로 가정하였다. 제주도 광역모델인 경우 X, Y방향의 격자 크기는 각각 1.500m로 하였으며 전체격자는 83×56×3층으로 구성하였다. 그리고 제주항과 서귀항의 경우 X, Y방향의 격자크기를 각각 100m로 하였으며 전체격자는 제주항의 경우, 54×42×3층 그리고 서귀항의 경우, 40×32×3층으로 구성하였다. 여기서 계산된 결과를 이용하여 수질변화를 예측하는 기본자료로 이용하였다.

제주도 항만의 수질 특성 및 예측

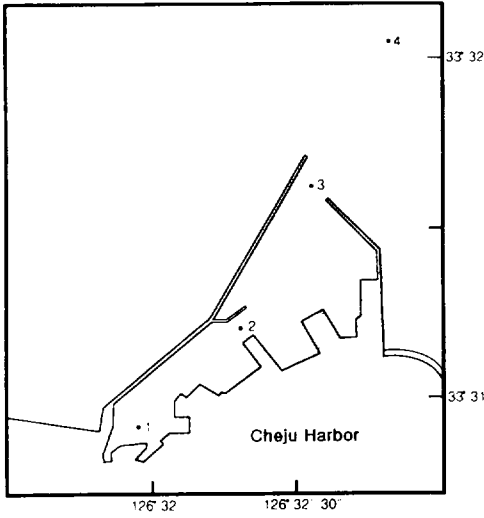


Fig. 1. Location of sampling sites at Cheju Harbor.

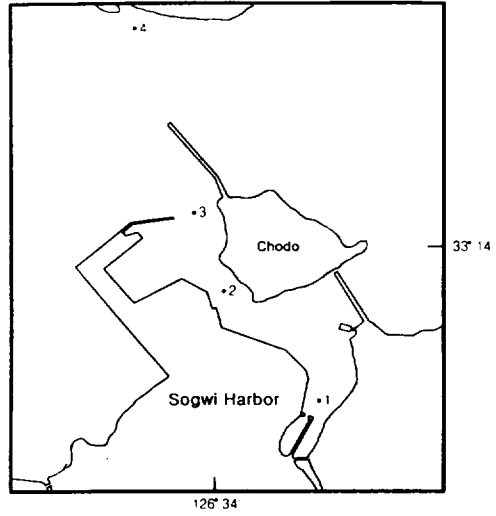


Fig. 2. Location of sampling sites at Sogwi Harbor.

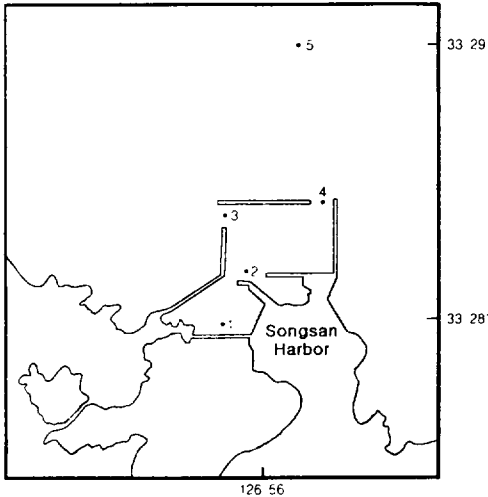


Fig. 3. Location of sampling sites at Songsan Harbor.

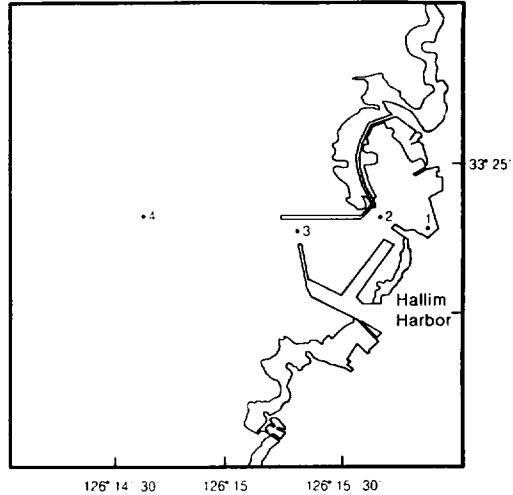


Fig. 4. Location of sampling sites at Hallim Harbor.

항만 수질 변화 예측

해수유동모델에서 계산된 유동자료를 이용하여 항만의 수질 변화를 예측하였다.

해수수질의 변화예측을 위해서 이용한 모델은 Metcalf and Eddy법에 기초를 두었다(Metcalf and Eddy, 1972). 즉, 어떤 시기의 한 지점에서 어떤 인자의 평균 농도(C, kg/m<sup>3</sup>)는 다음과 같다.

$$C = W / (\beta \times V)$$

여기서, W = BOD(또는 COD, T-N, T-P)의 항내 부하량(kg/day)

V = 항내 해수부피(m<sup>3</sup>)

$\beta = (1/T_0) + K$ (K는 유기물질 분해에 대한 탈산소계수 또는 영양염 섭취속도)

$T_0 = V/Q$  : Residence Time(day)

Q = 해수유입량(m<sup>3</sup>/day)

(단, 육상에서의 해수유입량은 해수유

입랑에 비해서 미약하므로 무시)

항만으로 유입되는 육상오염부하량 산정

항만으로 유입되는 오염부하량은 제주도(1997)가 제주도내 유수하천에 대해 오염부하량을 산정한 결과를 이용하였으며 제주항의 경우 산지천 그리고 서귀항의 경우 연외천에서 각 항구로 유입되는 점원부하량과 비점원부하량을 포함한 총부하량을 이용하였다.

결과 및 고찰

항만수질 조사결과

조사한 항만수질결과는 Table 1과 Fig. 5~Fig. 8에 나타냈으며 나타낸 값은 각 항내 지점별 평균치를 이용하였다.

pH의 분포는 전 조사기간을 통해 전 조사지점에서 7.98~9.05의 범위로 평균 8.23이었고 수온의 분포범위는 10.2~28.1°C의 범위로 평균 18.9°C였으며 연교차는 17.9°C를 보였다.

밀도류의 영향을 알 수 있는 염분분포를 보면, 전 조사기간에 걸쳐 전 조사지점에서 14.6~34.5%의 범위로 평균 31.9%를 나타내었으며, 연교차는 19.9%를 나타내었다. 월별로는 하계인 8월이 가장

낮은 농도를 보였다. 각 항내 조사지점별 농도를 비교해보면 지점별로는 하천수가 항으로 유입되는 항만 안쪽 1지점이 상대적으로 낮은 농도를 보였고 항외지역으로 갈수록 높아지는 경향을 보였다.

해역에서 유기오염의 일반 지표인 COD의 농도 분포는 Fig. 5에 월별 평균값으로 나타냈으며 전 조사기간동안 전 조사지점에서 1.04~8.00mg/l의 범위를 보였고 평균값은 1.84mg/l였다. 지점별로는 5월에 제주항 1지점에서 가장 높은 8.00mg/l를 보였다. 조사기간동안 조사항별로 오염의 정도를 비교해보면 제주항이 평균 2.48mg/l로 가장 높은 농도를 보이며 이는 해양수질환경기준 III등급에 해당되었고 나머지 항은 2mg/l 이하로 II등급에 해당되는 수질을 보였다. 각 항내 조사지점별로 비교해

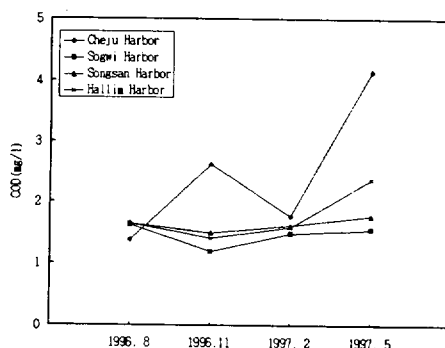


Fig. 5. Seasonal variation of COD at each harbor.

Table 1. The values of water quality at each harbor from August, 1996 to May, 1997.

Variable		pH	Temp. ( °C )	Sal. ( % )	DO ( )	COD	SS mg/ l	T-N	T-P ( )
Cheju Harbor	Range	8.06~9.05	12.1~27.7	18.0~34.1	5.95~8.55	1.19~8.00	1.10~6.60	0.062~0.690	0.011~0.041
	mean	8.40	18.8	31.7	7.10	2.48	3.03	0.231	0.021
Sogwi Harbor	Range	8.20~8.36	14.7~25.9	14.6~34.5	5.98~8.28	1.06~2.26	0.30~2.80	0.104~0.389	0.004~0.043
	mean	8.19	19.4	30.5	7.32	1.47	1.46	0.239	0.019
Songsan Harbor	Range	7.98~8.29	11.0~26.7	29.1~34.5	6.47~9.09	1.01~2.59	1.30~6.80	0.038~0.373	0.002~0.049
	mean	8.14	18.1	32.6	7.66	1.64	2.56	0.095	0.022
Hallim Harbor	Range	8.10~8.38	10.2~28.1	28.1~34.3	6.73~8.92	1.20~4.20	1.00~6.10	0.048~0.512	0.004~0.152
	mean	8.18	18.6	32.7	7.62	1.76	2.36	0.208	0.030

제주도 항만의 수질 특성 및 예측

보면 하천수가 항으로 유입되는 항만 안쪽 1지점이 상대적으로 높은 농도를 보였고 항외지역으로 갈수록 낮은 경향을 보였다. 이는 항만 외부지역보다 외해수 교환이 잘되지 않고 해수 유동이 매우 약함으로 인해 하천을 통해 만 내로 유입되는 오염물질이 정체되어 상대적으로 높은 값으로 나타나는 것으로 사료된다.

생물의 서식, 양식 및 산란에 적합한 환경의 지표로 사용되는 용존산소(DO)의 농도분포는 Fig. 6에 나타냈으며 전 조사기간동안 전 조사지점에서 5.95~9.09mg/l의 범위를 보였고 평균값은 7.43mg/l였다. 월별 농도 변화를 비교해보면 제주항을 제외하고 하계인 8월부터 증가하다가 동계인 2월 이후 감소되는 경향을 보였는데 이것은 수온의 감소로 인해 해수의 포화농도의 증가로 사료된다. 조사기간동안 조사항별로 평균농도를 비교해보면 제주항이 7.10mg/l로 가장 낮은 농도를 보이며 서귀항 7.32mg/l, 한림항 7.62mg/l 그리고 성산항 7.66mg/l 순으로 나타났다.

해역의 부영양화에 관계되며 영양염 중 암모니아 질소, 아질산 질소 그리고 질산 질소의 합계량으로 나타내는 총무기질소 농도분포는 Fig. 7에 나타냈으며 전 조사기간동안 전 조사지점에서 0.038~0.690mg/l의 범위를 보였고 평균값은 0.193mg/l였다. 지점별로는 동계인 2월에 제주항 1지점에서 가장 높은 0.690mg/l를 보였다. 그리고 조사기간동안 조사항별로 오염의 정도를 비교해보면 서귀항이 평균 0.239mg/l로 가장 높은 농도를 보이며 제주항 0.231mg/l 그리고 한림항 0.208mg/l의 순으로 이는 해역수질환경기준 III등급에 해당되었고 나머지 성산항은 0.095mg/l 이하로 II등급에 해당하는 수질을 보였다.

총인의 농도분포는 Fig. 8에 나타냈으며 전 조사기간에 걸쳐 0.002~0.152mg/l의 범위를 보였으며 평균값은 0.023mg/l였다. 월별 농도 변화를 비교해보면 전 조사지점에서 5월에 높은 농도를 보였다. 지점별로는 5월에 한림항 1지점에서 가장 높은 0.152mg/l를 보였다. 조사기간동안 조사항별로 오염의 정도를 비교해보면 한림항이 평균 0.030mg/l로 가장 높은 농도를 보이며 성산항 0.022mg/l, 제

주항 0.021mg/l 그리고 서귀항 0.019mg/l 순으로 나타났다. 그리고 전 조사지점에서 해역수질환경기준 III등급에 해당되어 인산 염에 의한 오염이 제주 해역에서 매우 심각한 것으로 나타나 생활하수의 고차처리가 필요한 것으로 사료된다.

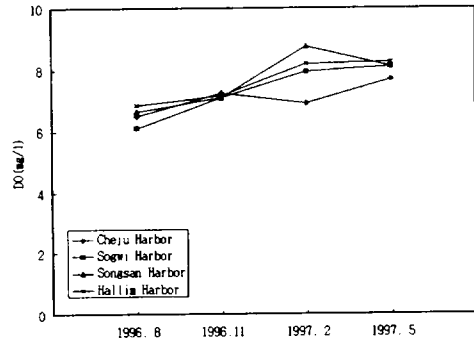


Fig. 6. Seasonal variation of DO at each harbor.

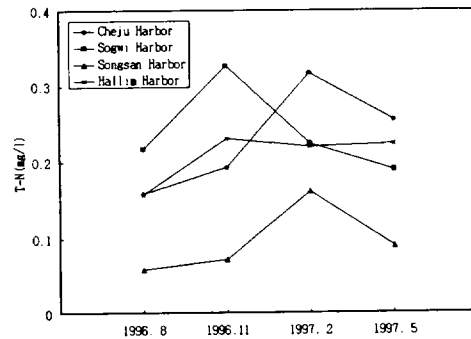


Fig. 7. Seasonal variation of T-N at each harbor.

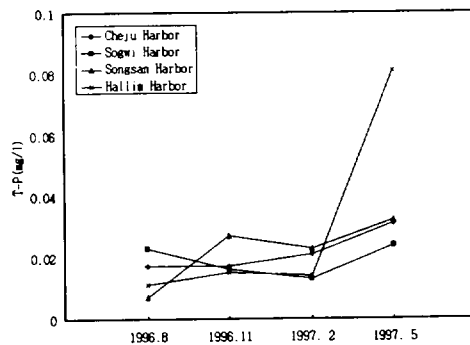


Fig. 8. Seasonal variation of T-P at each harbor.

항만수질 경년변화 조사결과

제주도내 항만들의 과거의 오염정도를 파악하기 위하여 환경통계연감(환경부, 1996)와 본 연구조사 시 조사된 값을 이용하여 4가지 항목인 화학적산소 요구량(COD), 용존산소(DO), 총질소(T-N) 그리고 총인(T-P)에 대하여 Fig. 9~Fig. 12에 나타내었다.

화학적산소요구량(COD)의 경년변화는 Fig. 9에 나타내었다. 년변화를 보면 대부분의 조사항이 서서히 증가하는 경향을 보였고 특히 제주항의 경우 1995년을 기점으로 급격히 증가하였다. 전 조사항의 결과는 제주항의 1996년과 1997년을 제외하면 해역수질기준 II 등급에 해당하는 수질을 보였다.

용존산소(DO)의 경년변화는 Fig. 10에 나타내었다. 년변화를 보면 전 조사항이 거의 유사한 경향을 보이고 있으며 1996년을 기점으로 감소하다 다시 증가하는 경향을 보였다.

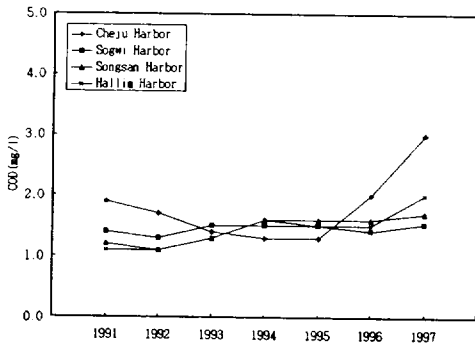


Fig. 9. Yearly variation of COD at each harbor.

총질소(T-N)의 경년변화는 Fig. 11에 나타내었다. 년변화를 보면 1991년부터 1995년까지 서서히 증가하고 있으며 서귀항을 제외하면 1996년까지 감소하였다가 그 이후 다시 증가하는 경향을 보였다.

총인(T-P)의 경년변화는 Fig. 12에 나타내었다. 년변화를 보면 조사항 모두가 거의 유사한 경향을 보이고 있으며 1991년부터 1995년까지는 유사한 농도를 보였다. 그러나 서귀항을 제외한 모든 항에서 1996년 이후 급격히 증가하는 경향을 보였다.

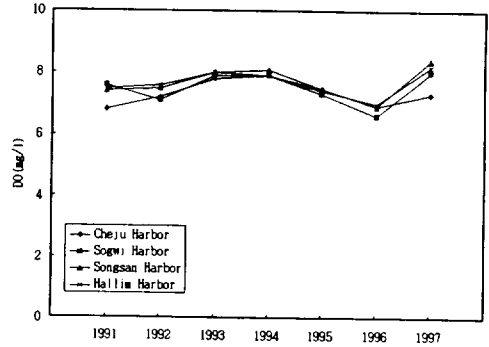


Fig. 10. Yearly variation of DO at each harbor.

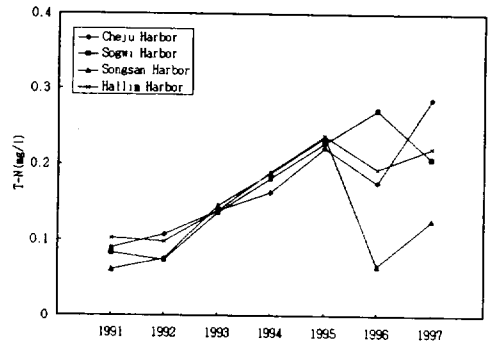


Fig. 11. Yearly variation of T-N at each harbor.

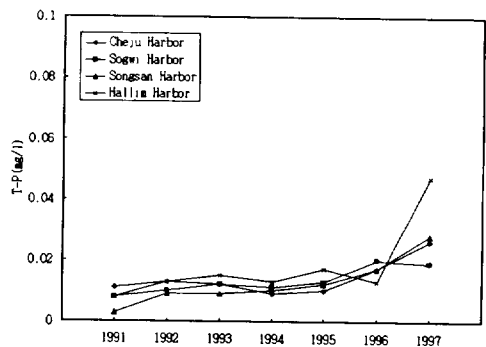


Fig. 12. Yearly variation of T-P at each harbor.

해수유동모델 계산결과로부터 항내의 해수교 환량 산정

해수유동모델에서 계산한 결과를 이용하여 제주

항과 서귀항내의 외해와의 해수교환량을 산정하였는데 그 결과는 다음과 같다.

1) 제주항의 해수교환량 산정

- 대상항구 내의 부피,  $V = 5,283,620\text{m}^3$
- 해수유입량,  $Q = A(\text{항의 경계 단면적}) \times 1$   
조석(창조시)의 유속성분의 합  
 $= 1,920\text{m}^2 \times 0.32\text{m/s} = 5.3$   
 $\times 10^7\text{m}^3/\text{d}$
- ∴ 체류시간,  $T_0 = 0.1\text{day}$

2) 서귀항의 해수교환량 산정

- 대상항구 내의 부피,  $V = 1,166,470\text{m}^3$
- 해수유입량,  $Q = A(\text{항의 경계 단면적}) \times 1$   
조석(창조시)의 유속성분의 합  
 $= 1,754\text{m}^2 \times 0.20\text{m/s} = 3.0$   
 $\times 10^7\text{m}^3/\text{d}$
- ∴ 체류시간,  $T_0 = 0.04\text{day}$

장래수질 예측결과

항구 내의 오염물 농도변화는 항내로 유입되는 육상부하량과 항구 외해에서 유입되는 부하량의 합으로 나타낼 수 있다. 여기서 항내로 유입되는 육상부하량은 하천오염부하량 산정에서 구한 값을 이용하였고 항구 외해에서 유입되는 부하량의 경우 외해의 평균농도에 해수유입량을 곱하여 산정하였다.

1996년 부하량을 이용하여 해수수질을 계산한 결과는 Table 2에 나타내었다. 화학적산소요구량(COD)의 경우 제주항과 서귀항은 각각 6.4%, 5.4%의 낮은 상대오차를 보였고, 총질소(T-N)의 경우 제주항과 서귀항은 각각 11.2%, 16.4%의 상대오차를 보였으며 화학적산소요구량(COD)의 경우 보다는 높은 값을 보였다. 그러나 총인(T-P)의 경우는 제주항과 서귀항이 각각 0%, 4.2%로 낮은 상대오차를 보였다.

이상의 결과에서 1996년 수질을 재현한 결과 20%이하의 낮은 상대오차를 보여 여기서 적용한 모델은 제주항과 서귀항의 수질을 잘 나타내므로 장래의 항내 수질을 단기(2001년), 중기(2010년) 그리고 장기(2020년)로 나누어 예측하였다.

Table 2. Comparison of calculated and observed concentrations in 1996.

Harbor	Variable	Observed (mg/ℓ)	Calculated (mg/ℓ)	R.E. (%)
Cheju Harbor	COD	2.770	2.592	6.4
	T-N	0.277	0.246	11.2
	T-P	0.021	0.021	0.0
Sogwi Harbor	COD	1.570	1.485	5.4
	T-N	0.267	0.223	16.4
	T-P	0.024	0.023	4.2

장기수질을 예측한 결과는 Table 3과 Fig. 13~ Fig. 15에 나타내었다.

화학적산소요구량(COD)을 예측한 결과는 Fig. 13에 나타냈으며 경년변화를 보면 제주항의 경우 1996년에는 2.592mg/ℓ에서 2020년에는 2.572mg/ℓ로 감소되는 경향을 보였고 서귀항의 경우 1.485mg/ℓ에서 1.451mg/ℓ로 감소되는 경향을 보였다. 그러나 육상에서 유입되는 오염부하량의 급격한 변화에 크게 영향을 받지 않는 것으로 계산되었으며, 이 원인은 항내로 유입되는 육상부하량이 외해에서 유입되는 해수유입량이 매우 작으므로 장래의 육상 부하량의 변화는 크게 항구 내의 화학적산소요구량(COD)농도에 영향을 미치지 않는 것으로 사료된다.

총질소(T-N)를 예측한 결과는 Fig. 14에 나타냈으며 경년변화를 보면 제주항의 경우 1996년에는 0.246mg/ℓ에서 2020년에는 0.244mg/ℓ로 감소되는

Table 3. Yearly variation of estimated water quality at Cheju Harbor and Songsan Harbor.

(Unit : mg/ℓ)

Harbor	Variable	Year			
		1996	2001	2010	2020
Cheju Harbor	COD	2.592	2.577	2.572	2.572
	T-N	0.246	0.244	0.244	0.244
	T-P	0.021	0.020	0.020	0.020
Sogwi Harbor	COD	1.485	1.459	1.451	1.451
	T-N	0.223	0.221	0.221	0.221
	T-P	0.023	0.022	0.022	0.022

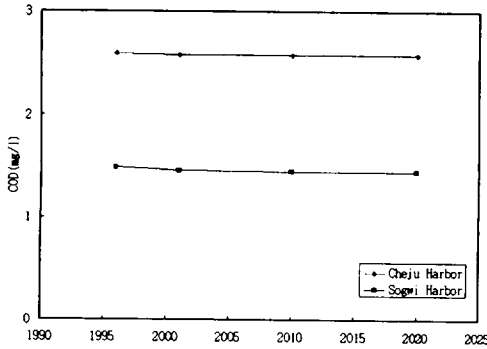


Fig. 13. Yearly variation of estimated COD concentration at Cheju Harbor and Sogwi Harbor.

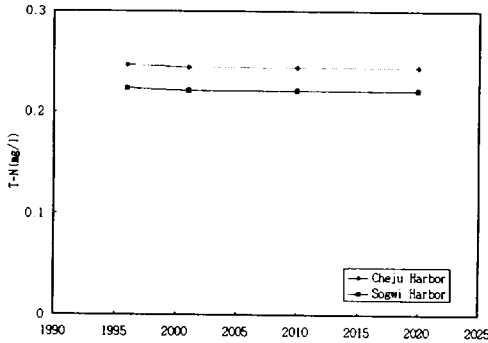


Fig. 14. Yearly variation of estimated T-N concentration at Cheju Harbor and Sogwi Harbor.

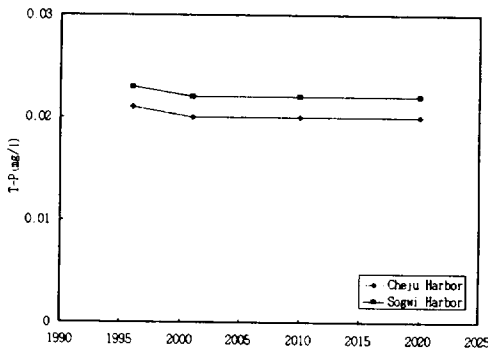


Fig. 15. Yearly variation of estimated T-P concentration at Cheju Harbor and Sogwi Harbor.

경향을 보였고 서귀항의 경우 1996년에는 0.223mg/l 에서 0.221mg/l 로 감소되는 경향을 보였다. 그러나

두 항구 모두 2001년 이후에는 해수수질 농도 변화가 없는 것으로 예측되어 원인은 화학적산소요구량(COD)의 경우와 같은 것으로 사료된다.

총인(T-P)을 예측한 결과는 Fig. 15에 나타냈으며 경년변화를 보면 제주항의 경우 1996년에는 0.021mg/l 에서 2020년에는 0.020mg/l 로 감소되는 경향을 보였고 서귀항의 경우 1996년에는 0.023mg/l 에서 0.022mg/l 로 감소되는 경향을 보였으나 총인(T-P)의 경우도 총질소(T-N)와 같은 경향을 보였다.

### 요약

제주도내 항만의 수질특성과 제주항과 서귀항의 장래 항만수질을 예측한 결과는 다음과 같다.

제주도내 항만의 수질농도를 보면 COD의 경우, 제주항이 가장 높은 농도를 보이며 이는 해역수질환경기준 III등급에 해당되었으며 나머지 항은 II등급에 해당되는 수질을 보였다. T-N의 경우 서귀항이 가장 높은 농도를 보이며 제주항 그리고 한림항순으로 조사되었으며 III등급에 해당되었고 나머지 성산항은 II등급에 해당되는 수질을 보였다. T-P의 경우 전 조사지점에서 III등급에 해당되었다.

제주항과 서귀항의 장래 항만수질을 예측한 결과를 보면 COD의 경우, 제주항은 1996년에는 2.592 mg/l 에서 2020년에는 2.572mg/l 로 감소되는 경향을 보였고 서귀항은 1.485mg/l 에서 1.451mg/l 로 감소되는 경향을 보였다. T-N의 경우 제주항은 1996년에는 0.246mg/l 에서 2020년에는 0.244mg/l 로 감소되는 경향을 보였고 서귀항은 1996년에는 0.223mg/l 에서 0.221mg/l 로 감소되는 경향을 보였다. T-P의 경우, 제주항은 1996년에는 0.021mg/l 에서 2020년에는 0.020mg/l 로 감소되는 경향을 보였고 서귀항의 경우 1996년에는 0.023mg/l 에서 0.022 mg/l 로 감소되는 경향을 보였다. 이와 같은 낮은 감소율은 본 연구에 적용한 해수교환량을 이용하여 항만수질을 예측한 결과 육상에서 유입되는 오염부하량의 급격한 변화에 크게 영향을 받지 않는 것으로 계산되었으며, 이 원인은 항내로 유입되는 육상



부하량이 외해에서 유입되는 해수유입량에 비교하여 매우 작으므로 장래의 육상 부하량의 변화에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 사료된다

### 참고문헌

- 國立環境研究院, 1991. 全國 主要沿岸 流入汚染負荷量 算定에 關한 調査研究. 71 pp.
- 김광수 · 박청길 · 조은일, 1996. 생태계 모델을 이용한 황해의 환경용량 산정. 한국수질보전학회지, 12(4), 383~399.
- 김종구 · 박청길 · 김광수, 1994. 하계 마산만의 부영양화 제어를 위한 생태계모델의 적용. 한국환경과학회, 3(3), 185~195.
- 김종구 · 박청길 · 신성교, 1995. 진해만 해역의 하계 부영양화 모델링(I): 생태계모델을 이용한 식물플랑크톤 농도 분포 시뮬레이션. 대한환경공학회지, 17(2), 121~135.
- 조은일 · 박청길 · 이석모, 1996. 駕莫灣의 環境容量 算定(I) -생태계모델을 이용한 기초생산력 산정-. 한국수산학회지, 29(3), 369~385.
- 조은일 · 박청길 · 이석모, 1996. 駕莫灣의 環境容量 算定(II) -굴양식장 환경용량 산정-. 한국수산학회지, 29(5), 709~715.
- 濟州道, 1994. 濟州道 綜合開發計劃. p. 531.
- 제주도, 1997. 환경백서. p. 42.
- 제주도, 1997. 제주도 친환경개발을 위한 환경지표 설정. p. 238.
- 최우정 · 박청길 · 이석모, 1994. 진해만의 빈산소수괴 형성에 관한 수치실험. 한국수산학회지, 27(4), 413~433.
- 환경처, 1991. 제주도 환경보전 종합대책 -수질 오염방지 장기 계획 중심으로-. p. 244.
- 환경부, 1996. 환경통계연감. p. 577.
- 日本通商産業省 資源環境技術總合研究所, 1986. 浜名湖 · 磐田地區産業公害總合事前調査. -水質豫測シミュレーション報告書 -. 80 pp.
- Metcalf and Eddy, 1972. Wastewater Engineering. Mcgraw-Hill, New York, 1209 pp.