

수영만 수질에 미치는 비점원 오염부하의 특성과 영향

조은일 · 이석모 · 박청길
부산수산대학교 환경공학과

The Characteristics and the Effects of Pollutant Loadings from Nonpoint Sources on Water Quality in Suyeong Bay

Eun Il CHO, Suk Mo LEE and Chung-Kil PARK

Department of Environmental Engineering, National Fisheries University of Pusan,
Pusan 608-737, Korea

The most obvious and easily recognizable sources of potential water pollution are point sources such as domestic and industrial wastes. But recently, the potential effects of nonpoint sources on water quality have been increased apparently. In order to evaluate the characteristics and the effects of nonpoint sources on water quality, this study was performed in Suyeong Bay from May, 1992 to July, 1992.

The depth-averaged 2-dimensional numerical model, which consists of the hydrodynamic model and the diffusion model was applied to simulate the water quality in Suyeong Bay.

When flowrate was 65.736m³/s, the concentration of pollutants (COD, TSS and VSS) at Oncheon stream (Sebeong bridge) during second flush were very high as much as 121.4mg/l of COD, 1148.0mg/l of TSS and 262.0mg/l of VSS. When flowrate was 4.686m³/s, the concentration of pollutants (TIN, NH₄⁺-N, NO₂⁻-N and PO₄³⁻-P) during the first flush were very high as much as 20.306mg/l of TIN, 14.154mg/l of NH₄⁺-N, 9.571mg/l of NO₂⁻-N and 1.785mg/l of PO₄³⁻-P.

As results of the hydrodynamic model simulation, the computed maximum velocity of tidal currents in Suyeong Bay was 0.3 m/s and their direction was clockwise flow for ebb tide and counter clockwise flow for flood tide.

Four different methods were applied for the diffusion simulation in Suyeong Bay. There were the effects for the water quality due to point loads, annual nonpoint loads and nonpoint loads during the wet weather and the investigation period, respectively. The effects of annual nonpoint loads and nonpoint loads during the wet weather seem to be slightly deteriorated in comparison with the effects of point loads. However, the bay was significantly polluted by the nonpoint loads during the investigation period. In this case, COD and SS concentrations ranged 2.0~30.0mg/l, 7.0~200.0mg/l in ebb tide, respectively.

From these results, it can be emphasized that the large amount of pollutants caused by nonpoint sources during the wet weather were discharged into the bay, and affected significantly to both the water quality and the marine ecosystem. Therefore, it is necessary to consider the loadings of nonpoint pollutants to plan wastewater treatment plant.

Key words : water quality simulation, nonpoint sources, Suyeong Bay, hydrodynamic model, diffusion model

서 론

수영만은 우리나라 남해 동단에 위치하여 해운대 동백섬 남단과 이기대를 연결하는 내만 해역으로 만 내에는 국제적인 요트경기장과 광안리 해수욕장이 위

치해 있고, 해운대 해수욕장이 인접해 있는 우리나라에서 제일 가는 관광지이나 도시하천인 수영강을 비롯한 춘천, 대연천, 용호천 등을 통하여 도시하수가 유입됨으로 인하여 수영만내 수질이 점차 오염되고 있어 수질관리대책이 시급한 실정이다.

수영만의 수질조사는 지금까지 많은 연구자들에 의해 여러 차례 수행되어 왔다. Lee (1982)는 수영만의 적절한 수질오염 관리를 위하여 만으로 유입되는 도시 하수의 오염부하량과 수영만의 수질 및 저질의 분포특성을 조사하였고 Chun (1987)은 수영강 하구의 수질특성과 수질모델에 관한 연구를 수행하였다. 해수유동조사로 Kim and Lee (1991)는 하구에서 Two-level 모델에 의한 해수유동 및 확산에 관한 수치실험을 수행하여 수영만의 해수유동을 재현하였으며, Jung and Yoa (1992)에 의해 수영강 및 여러 지천에 의한 수질오염예측 모델링이 수행되었다.

지금까지 수영만에서의 수질조사는 단순한 수질현상조사와 오염물질 부하량의 변동에 의한 수질예측모델링을 실시하였으며 주로 수영강을 비롯한 각 도시 하천에서 유입되는 점원오염원으로부터 유입되는 부하량만으로 수질을 예측하였으나, 그 결과 비점원오염을 고려하지 않고 실시된 수질예측에는 많은 오차를 유발시킬 가능성이 크다. 또한 우리나라에서 강우시 유출되는 비점원오염물질에 관한 연구는 Choi (1986)와 Park (1982) 등에 의해 연구된 바가 있으나 이들은 하천에 유입되는 오염물질에 한정되었고 이들 비점원오염물질이 만나나 바다로 유입되어 미치는 영향에 관한 연구는 전무한 상황이다.

우리나라의 하수는 도시하천을 통해 연안해역으로 유입되고 있는데, 하수관망의 형태를 보면 대부분이 합류식 하수관거로 이루어져 있다. 합류식 하수관거의 경우 건기시에는 하수관거내 많은 오염물질들이 적은 유량과 느린 유속에 의해 퇴적되어 있다가 우기시에는 많은 유량과 빠른 유속에 의해 씻겨 내려가 이들은 매우 큰 비점원오염물질로 작용될 수 있다(Choi, 1986). 이러한 문제점으로 인해 비점원오염부하가 연안해역의 수질에 어떻게 영향을 미치는가를 규명할 필요가 있다.

따라서 본 연구는 인구밀도가 높고 많은 공장지역이 밀집되어 있으며 대부분이 합류식 하수관거로부터 우기시 연안해역으로 직접 오염물질을 가중시킬 수 있는 수영만에 대해 비점원오염물질 배출특성을 조사하고 2차원 해수유동 및 확산모델을 적용하여 비점원오염부하가 만내 수질에 미치는 영향을 예측 평가하고자 한다.

재료 및 방법

1. 조사방법

1) 현장관측

본 연구를 위해 대상지역으로 선정된 조사지역 및 오염부하량 조사지점은 Fig. 1에서와 같이 수영만의 경우는 14개의 정점을 선정하였다. 하천의 경우 수영강 제 1 지류인 온천천의 A지점과 수영강의 B지점, 춘천 하류인 C지점, 그리고 강우시는 온천천의 D지점(세병교)을 선정하였다.

수질측정은 조사지역 내의 지천과 만내의 수질 및 오염부하량을 조사하기 위해 1992년 5월부터 8월까지 갈수시 및 강우시로 나누어 조사하였다. 그리고 수질 항목으로는 수온, pH, 용존산소(DO), 총부유물질(TSS), 화학적 산소요구량(COD) 그리고 영양염으로는 암모니아 질소(NH_4^+-N), 아질산 질소(NO_2^--N), 질산 질소(NO_3^--N), 총무기질소(TIN) 및 인산인($\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$, DIP)을 측정하였다.

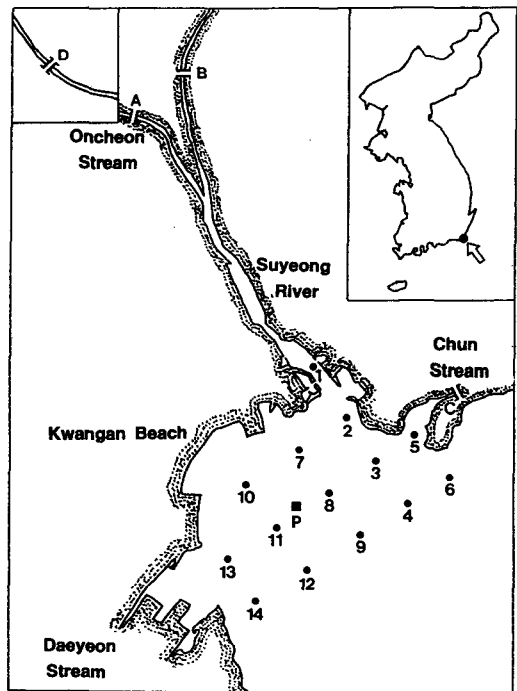


Fig. 1. Location of sampling site in Suyeong Bay.

갈수시 조사는 일중 오염물질의 농도변화를 알기 위해 2~4시간 간격으로 24시간 관측하였으며 각 하천에 대해 2번씩 조사하였다. 강우시 조사는 강우 시작부터 강우가 끝날 때까지 5~30분 간격으로 연속 채취하였고, 수영강 합류점으로부터 3.9km 되는 지점인 온천천(세병교)에서 채수하여 조사하였다. 그리고 수영만의 경우 갈수시 조사는 대조기와 소조기에 각각 창조와 낙조시로 나누어 14개의 정점에서 수온 및 용존산소를 현장 관측하고, 다른 수질항목은 반돈채수기로 표층 및 저층수를 채취하여 실험실에서 분석하였다.

비점원오염이 만내수질에 영향을 미치는 강우시 조사는 1992년 7월 11일 우기시에 14개의 정점에서 수온과 용존산소는 현장관측하고, 다른 수질항목은 시료를 채취하고 실험실에서 분석하여 강우 유출수가 만내 유입되어 수질에 미치는 영향을 조사하였다.

강우강도는 부산지방 기상대의 시간별 강우량 자료를 이용하였다.

2) 점원·비점원오염부하량 산정

점원오염부하의 경우에는 건기 중에 각각 A, B, C 지점에서 24시간 실측을 하여 시간별 농도에 유량을 곱하여 오염부하량을 계산하였다. 그리고 수영하수처리장에서 배출되는 오염부하량은 유출수의 농도에 유출유량을 곱하여 오염부하량을 구하였다.

비점원오염부하의 경우는 전 배수지점에서 측정이 불가능하므로 온천천 D지점에서 강우 초기부터 강우가 끝날 때까지 현장관측하고 세병교 상류지점의 토지이용, 수영강 배수구역내 토지이용 그리고 춘천 배수구역의 토지이용을 도시지역, 농작지 그리고 산림지역으로 구별한 후 유역전체에 대한 오염부하량은 D지점에서 실측한 오염부하량을 이용해 원단위법으로 전 배수구역에서 배출되는 오염부하량을 산출하였다. 그리고 대연천의 경우에는 Choi (1986)의 자료를 이용하였다.

2. 모델의 적용

수영만 수질에 미치는 비점원 오염부하의 영향을 조사하기 위해 2가지의 모델(해수유동모델과 확산모델)을 이용하였다.

두 모델에서는 수치계산을 위해 Leendertse (1971)에 의해 조류 확산계산에 응용되어, 현재 자주 이용

되고 있는 ADI법(alternating direction implicit method)을 사용하였고, 같은 격자망과 수심자료를 이용하며, 해수유동모델은 대상구역 내의 모든 격자점에 있어서 시간에 따른 수위, 유속을 계산하고, 확산모델은 이 결과를 이용하여 대상구역 내의 오염물 분포를 계산한다.

결과 및 고찰

1. 비점원 오염부하의 특성

1) 강우시 오염물질의 유출특성

강우시 온천천(세병교) D지점에서 유량 및 오염물질을 측정된 결과 강우 유출수의 특징은 Fig. 2와 같이 1992년 7월 10일 11시부터 17시 20분까지 총 21.3mm의 강우에 대해 15~30분 간격으로 강우의 지속에 따른 유량과 COD, SS 및 영양염류의 농도변화를 나타냈다.

7월 10일에 내린 강우의 특징을 보면 총강우량은 21.3mm이고 강우는 11시부터 1시까지 5.6mm의 1차 강우가 온 후 15시 30분부터 17시 20분까지 15.7mm의 2차 강우가 내렸다.

유량변화는 우선 1차 강우 5.6mm이 온 후 약 30분 경과 후 유량이 증가하여 유량이 4.686m³/s까지 증가하다 감소하기 시작하여 약 2시간 후 2차 강우 15.7mm의 최대 강우가 내린 후 최대 유량인 65.736m³/s까지 증가하다가 감소하였다.

COD의 경우는 유량과 비슷한 양상을 보여 주고 있다. 1차 강우가 시작된 후 유량증가와 함께 증가하여 76.8mg/l의 높은 농도가 나타나고 강우가 멈춘 후 농도가 감소하기 시작했다. 2차 강우가 시작되자 농도가 다시 증가하여 최고치인 121.4mg/l까지 증가하였다.

TSS와 VSS는 COD의 유출특성과 유사한 양상을 보여주며 1차 강우에 의한 최대치는 각각 504.0mg/l와 174.0mg/l이고 2차 강우에 의한 최대치는 각각 1148.0mg/l, 262.0mg/l로서 온천천의 갈수시 최대치 각각 51.5mg/l, 27.8mg/l와 비교해 볼 때 각각 22배, 9배 높은 값을 보여주며 강우유출수의 수질이 매우 나쁨을 잘 보여준다. 그리고 Choi (1986)의 대연천에서 조사한 최대농도인 1273.9mg/l보다는 낮은 값을 보여준다.

영양염류의 경우에는 1차 강우가 시작되면서 TIN,

NH_4^+-N , NO_2^--N 는 점점 감소하고 $\text{PO}_4^{3--}\text{P}$ 의 경우는 약간 증가하다 감소하기 시작하였다. 최대치는 각각 20.306mg/l, 14.154mg/l, 9.571mg/l, 1.785mg/l를 나타내고 강우가 지속됨에 따라 큰 변화없이 감소하는 양상을 보였으며 2차 강우가 시작된 후 약간 증가하다가 다시 감소하는 현상을 보여준다.

최대유량은 최대 강우강도 후 일정한 유달시간이 경과한 후에 나타나는 것이 일반적이다. 본 조사시는 부산지방 기상대의 시간별 강우량 자료를 이용했기 때문에 관측지점에서 유량과 강우강도는 다소 차이

가 있을 것이다. 유량은 10분간 최대 강우량이 나타난 후 약 30분이 경과 후 최대유량이 나타났다.

대연천의 경우는 Fig. 3에 나타났다.

Fig. 3은 1985년 6월 7일에 8시 57분부터 13시 50분까지 총 18.6mm의 강우에 대해 20~30분 간격으로 강우의 특성에 따른 COD, TSS 및 영양염류의 농도 변화를 나타낸 것이다. 모든 수질 측정치는 강우가 시작된 직후의 초기강우에 의하여 최대농도가 나타나며 수질의 변동은 강우강도나 유량의 증감과 밀접한 관계를 가지고 있다.

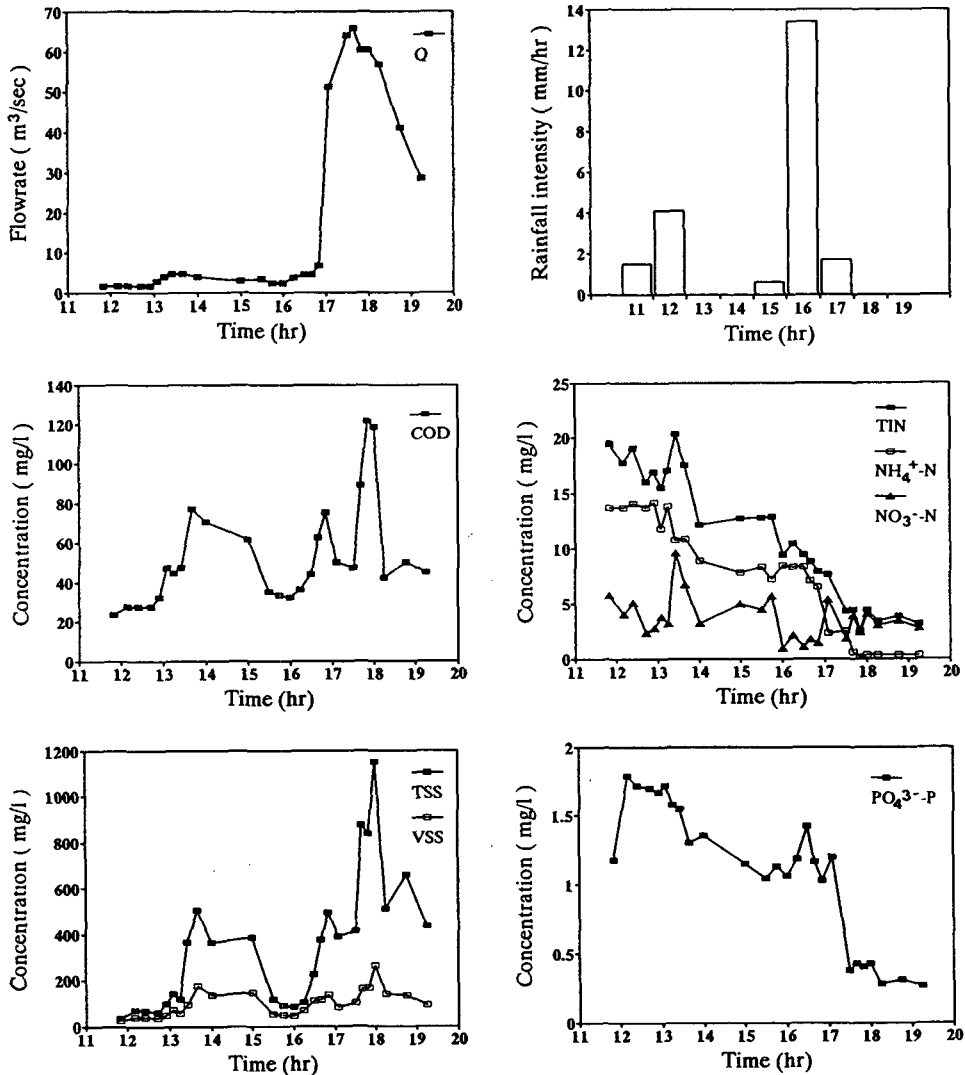


Fig. 2. Variations of the flowrate and the pollutant concentrations at St. D (Sebeong Bridge in Oncheon Stream) in Suyeong Bay during the storm of July 10, 1992.

수영만 수질에 미치는 비점원 오염부하의 특성과 영향

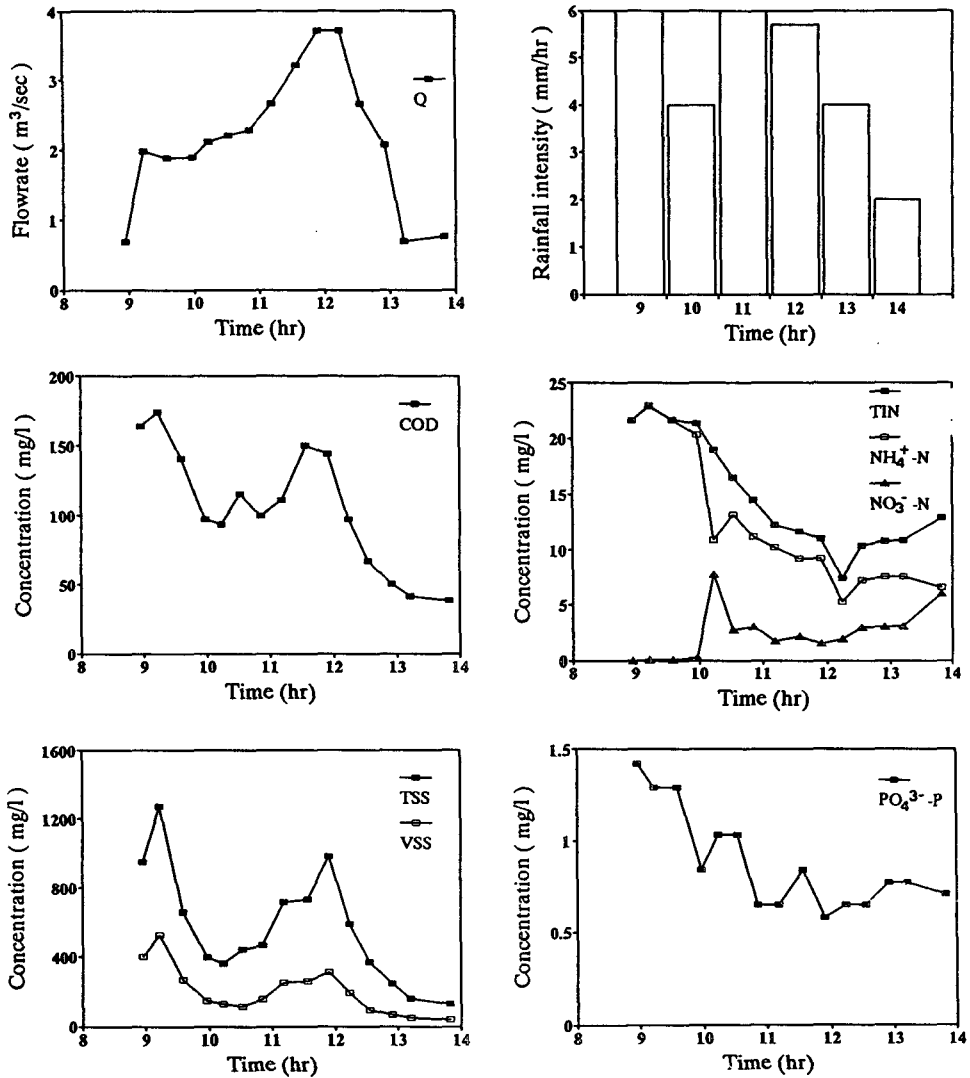


Fig. 3. Variations of the flowrate and the pollutant concentrations at Daeyeon Stream during the storm of June 7, 1985.

2. 오염부하량 산정

1) 점원오염부하량

점원오염부하량은 온천천 A지점, 수영강 B지점, 춘

천 C지점에서 1992년 5월과 7월에 24시간 실측한 것과 대연천의 경우는 1985년 5월의 Choi(1986)의 자료를 이용하여 구하였다.

Table 1. Pollutant loads from point sources

(unit : kg/hr)

Station	COD	TSS	VSS	NH ₄ ⁺ -N	NO ₂ ⁻ -N	NO ₃ ⁻ -N	TIN	PO ₄ ³⁻ -P
Oncheon (At.A)	213.4	289.7	201.6	126.672	4.038	2.222	132.932	16.000
Suyeong (At.B)	1099.6	870.8	411.7	392.421	7.608	8.305	408.334	19.291
Chun (At.C)	2.2	4.2	2.3	1.158	0.025	0.046	1.229	0.159
Daeyeon	42.0	57.7	40.7	9.238	0.110	0.157	9.501	1.250

Table 2. Area according to land use (unit : km²)

Source	Forest Area	Crop Land	Urban Area	Total
Suyeong River	146.6	3.1	50.2	199.9
Chun Stream	11.6	0.6	3.9	16.1
Sebeong Bridge	29.3	-	6.1	35.4

Table 3. Pollutant loads from nonpoint sources in different area (unit : ton/km²/yr)

Source	COD	SS
Forest Area	0.986 (0.545~1.856)	0.464 (0.035~0.974)
Crop Land	9.190 (4.630~17.200)	2.300 (1.140~4.340)
Urban Area	69.050 (49.000~132.800)	83.120 (59.000~159.900)

Table 4. Annual nonpoint source pollutant loads by the rivers discharging into the Suyeong Bay (unit : ton/yr)

Source	COD	SS
Suyeong River	3,639.3 (2,554.1~6,992.0)	4,247.8 (2,970.5~8,183.2)
Chun Stream	286.2 (200.2~549.8)	330.9 (231.2~637.5)
Daeyeon Stream	42.0	295.5

Table 5. Nonpoint source pollutant loads during the wet weather (unit : kg/day)

Source	COD	SS
Suyeong River	35,679.4 (25,040.2~68,549.0)	41,645.1 (29,122.5~80,227.5)
Chun Stream	2,806.3 (1,962.7~5,390.2)	3,244.1 (2,266.7~6,250.0)
Daeyeon Stream	1147.2	8016.0

Table 6. Nonpoint source pollutant loads during the investigation period (unit : kg/hr)

Source	COD	SS
Sebeong Bridge	4,770.7	42,414.2
Suyeong River	38,574.6 (27,097.8~74,100.8)	346,055.8 (253,163.2~667,395.3)
Chun Stream	3,034.0 (2,124.0~6,812.8)	29,960.1 (19,718.1~51,994.2)
Daeyeon Stream	864.5	4,740.3

오염부하량은 시간별 오염물 농도와 유량의 곱으로 계산된 월별 오염부하량을 평균하여 계산하였다. 점원오염부하량은 Table 1에 나타내었다. Table 1을 보면 수영강이 가장 많은 오염부하량을 수영만으로 유입시키는 것을 알 수 있다. 그리고 수영하수처리장의 경우 처리유출수의 농도와 유출유량을 곱하여 수영만으로 유입시키는 부하량을 구할 수 있다. COD와 TSS는 각각 69.44kg/hr, 74.87kg/hr 의 부하량을 수영만으로 유입시킨다.

2) 비점원오염부하량

비점원오염부하량은 1992년 7월 10일 온천천(세병교) D지점에서 강우시부터 강우가 끝날 때까지 측정된 자료를 이용하여 원단위법으로 구하였다.

배수구역내 토지이용별 구분은 산림지역, 경작지와 도시지역 3가지로 나누어 구하였다. 토지이용별로 보면 수영강의 경우 산림지역이 146.6km²으로 가장 많이 차지하고 도시지역이 50.2km²를 차지하며 전체면적은 199.9km²이다. 세병교는 수영강 배수구역내에 포함된다. 그리고 배수구역내의 토지이용은 Table 2와 같다.

우리나라의 토지 이용별 오염부하량은 Table 3에 나타내었다.

Table 3은 1981년 5월부터 8월까지 조사한 자료이며 대상지역은 도시지역이 서울시 성북천과 용두동 유수지였으며 농작지역 및 산림지역은 서울시에서 5 km 떨어진 경기도 고양군에 있는 가시골을 중심으로 조사한 자료이다.

(1) 원단위법에 의한 연간 오염부하량 산정

연간 오염부하량은 단위 면적당 오염부하량(Table 3)에 토지 이용별 배수면적(Table 2)을 곱하면 구할 수 있다. 연간 오염부하량은 Table 4에 나타내었다.

(2) 원단위법에 의한 우기 오염부하량 산정

부산지방에서는 38년간(1952~1990)의 강우자료에 의하면 연간 평균 102일의 강우 일수를 기록하고 연평균 강수량은 1,444.4mm으로서 전국의 연평균 강수량 1,159mm을 훨씬 상회하는 다우지역에 속한다. 그리고 월별 강수량 분포는 상당한 차이를 보이며 6월부터 9월까지 4개월 동안의 강수량이 연간 강수량의 60%를 차지하고 있으며 7월에 평균 244.6mm으로서 최대치를 보여준다. 따라서 년간을 통한 오염부하량을 계산하면 실제 강우가 내리는 동안 발생하는 오염부

Table 7. Input data for hydrodynamic model

Parameters	Input values
Mesh size	$\Delta x = \Delta y = 100m$
Water depth	chart datum + α
Time interval	$\Delta t = 10 \text{ sec}$
Coriolis coefficient	$f = 2\omega \sin \phi$, $\omega = 2\pi / (24 \times 60 \times 60)$, $\phi = 35^\circ 3' N$
Chezy coefficient	$C = \frac{1}{n} h^{1/6}$
Tidal level at open boundary	spring: $H_L = 0.548 \sin[(2\pi/T_0)n(\Delta t/2) - 0.0]$ $H_R = 0.502 \sin[(2\pi/T_0)n(\Delta t/2) - 0.05]$
River flow	$10.0m^3/sec$
Initial water level and current velocity	0.0

H_L : tidal level in left-side open boundary
 H_R : tidal level in right-side open boundary

하량은 과소 평가될 수가 있다. 따라서 강우일수를 고려한다면 강우가 내리는 동안 평균오염부하량을 계산할 수 있다.

우기 오염부하량은 연간 단위면적당 오염부하량 (Table 3)에 배수 면적 (Table 2)을 곱하고 강우일수 (102d/yr)로 나누어 주면 구할 수 있다. 우기의 오염부하량은 Table 5에 나타내었다.

(3) 실측과 원단위법에 의한 강우조사시 오염부하량 산정

수영강과 춘천의 오염부하량은 배수면적내 토지 이용형태별로 면적을 나누고 토지 이용에 따라 단위 면적당 오염부하량 (Table 3)에 면적을 곱하여 여기에 실측을 한 D지점에서 오염부하량을 이용하여 원단위법으로 조사기간 동안의 5시간 강우로 인한 각 하천별 오염부하량을 구할 수 있다.

강우 조사시 오염부하량을 Table 6에 나타내었다. 대연천의 경우는 1985년 6월 7일에 5시간 동안 18.6 mm의 강우에 대해 조사한 자료를 이용하였는데 실제로 강우시간과 강우량이 유사하므로 적용하는데 무리가 없으리라 사료된다.

3. 만내수질

COD는 조사기간 동안 만내 창·낙조의 평균값은 1.5~3.0mg/l로서 환경청고시 해역 수질기준 II등급 정도의 수질을 보여주나 수영강 하구부분에는 평균 5.2mg/l로서 매우 나쁜 수질현상을 보여준다. TSS는 만내 평균농도는 6mg/l정도로서 I 등급 수질을 보여주

나 수영강 하구부분에는 10mg/l이상의 높은 농도를 보여준다. pH는 하구부분은 7.5정도를 나타내고 만내는 8.1정도를 나타낸다. 총질소와 총인의 경우에는 III 등급이하의 수질을 보여주어 과영양해역으로 나타났다.

4. 해수유동

1) 입력자료

해수유동모델을 수영만에 적용하기 위하여 대상지역을 2차원 격자망으로 구성하였다. 그리고 격자를 구성할 때는 확산계산 수행시 물질배출 특성을 고려하여 연구대상지역의 지형이 심하게 왜곡되지 않는 범위내에서 가로 세로 각각 100m 간격으로 격자를 나누고, 가로방향 격자수 $I=59$

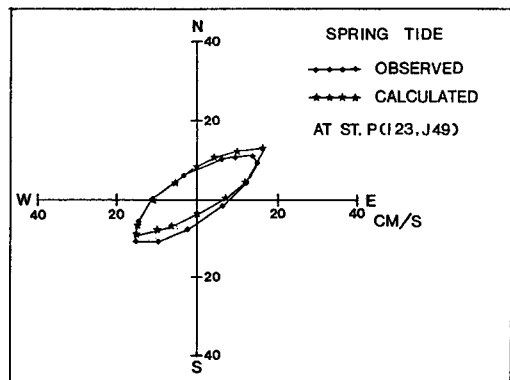


Fig. 4. Comparison of the tidal current ellipses between computed and observed results in Suyeong Bay.

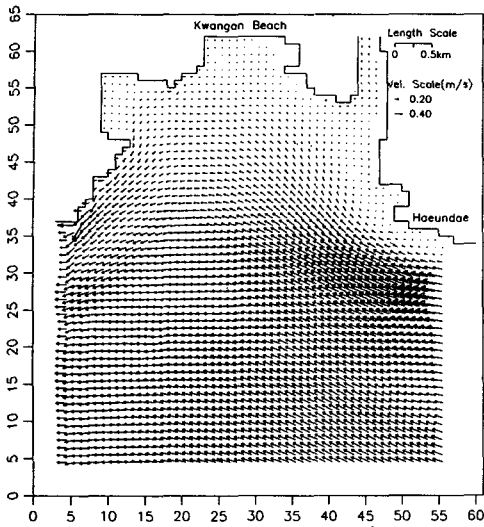


Fig. 5. Computed tidal currents at the spring (flood) tide in Suyeong Bay.

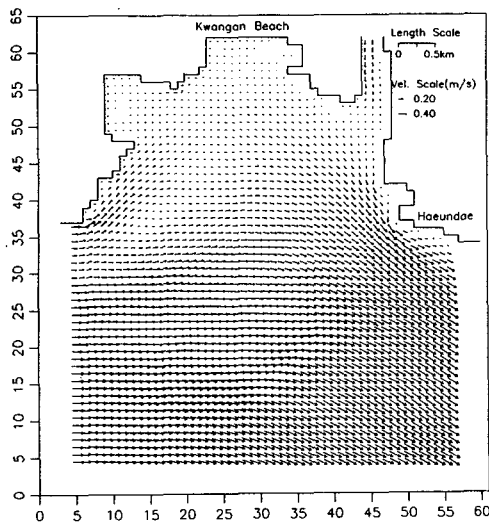


Fig. 6. Computed tidal currents at the spring (ebb) tide in Suyeong Bay.

개, 세로방향 격자수 $J=61$ 개로 하였다. 또 대상 해역의 해수유동은 바람에 의해 직접적으로 영향을 받지 만, 풍향·풍속의 변화가 일정치 않으므로, 바람의 영향은 무시하였다. 계산시간간격(Δt)은 계산의 안정성 및 수렴성을 지배하는 주된 인자로서 안정조건(stability condition)을 고려하여 10초로 하였다. 경계조건으로 하천경계에서는 수영강의 담수유입은 고려하였으나 기타 지천의 담수유입은 소량이므로 무시하였다. 이로 인한 해수유동의 영향은 별로 없을 것으로 여겨진다. 해양경계에서는 조석이 주된 경계조건으로 설

정되며, 조석은 이 경계면에서 반일주조 특성을 고려하여 평균 대조차를 조석의 진폭으로 강제수위를 주고, 그 주기를 12시간 25분으로 하는 정현곡선으로 입력하였다. 이상의 입력조건을 요약하면 Table 7과 같다.

2) 해수유동결과

모델의 적용성을 검토하기 위하여 모델에 의한 계산결과와 반일주조성분의 관측결과를 Fig. 4에 조류타원도(tidal current ellipse)로 나타내었다. P지점의 경우 관측치는 대조기인 1989년 10월 16~17일(월령 16.2~17.2)에 측정된 결과이며 관측유속의 유향분포는 모두 북동-남서방향으로 조류타원의 회전방향은 시계방향이다. 계산유속은 관측유속과 매우 유사하게 나타났으며 계산유속이 관측유속보다 약간 북동쪽으로 이동되어서 나타났다.

임의의 지점에서 수위변화를 조사한 결과 25시간(2조석)이 경과하면서 안정상태에 도달하였다. 해수유동모델의 계산 결과 0시간부터 37.5시간(3조석)까지 3분간격으로 수위 및 x, y방향 유속자료를 얻었다. 따라서 3조석 동안의 유속자료 중 창·낙조시 최강유속을 벡터로 플로트하여 Fig. 5, Fig. 6에 각각 나타내었다. 벡터도를 보면, 만내의 유속은 최대 0.3 m/sec 만 외의 유속은 0.4 m/sec 정도이고, 유향은 낙조시에 시계방향으로 창조시에 반시계방향으로 환류를 형성하고 있다. 이상의 결과로 보면, 전반적으로 모델에 의한 계산결과는 관측결과를 유사하게 재현하고 있는 것으

Table 8. Input data for the diffusion model

Parameters	Input values
Mesh size	$\Delta x = \Delta y = 100m$
Water depth	chart datum + a
Time interval	$\Delta t = 180sec(3min)$
Pollutant loads	refer to <Table 9>
Diff. coef. (K)	1.0m ² /sec for COD 1.0m ² /sec for SS
Open boundary conc.	1.0mg/l for COD 6.0mg/l for SS
Initial conc.	1.0mg/l for COD 6.0mg/l for SS
Decay coef. (k1)	0.105/d for COD
Sedimentation coef. (k2)	0.223/d for SS
Total run time	5 cycle

Table 9. Input data of pollutant loads at each stream for diffusion model (unit : kg/hr)

Case	parameter	Suyeong River	Chun Stream	Daeyeon Stream
Case 1 ¹	COD	1,382.4	2.2	42.0
	SS	1,235.4	4.2	57.7
Case 2 ²	COD	1,797.8	34.9	46.8
	SS	1,720.3	42.0	91.4
Case 3 ³	COD	2,869.0	119.1	89.8
	SS	2,970.6	139.4	391.7
Case 4 ⁴	COD	39,957.0	3,036.2	906.5
	SS	347,291.2	26,964.3	4,808.0

¹ point source pollutant loads

² annual nonpoint source pollutant loads

³ nonpoint source pollutant loads during the wet weather

⁴ nonpoint source pollutant loads during the investigation period

로 판단된다.

5. 점원 비점원오염부하에 의한 확산

1) 확산모델 입력인자

확산모델은 동수력학모델에서 얻어진 유속 및 조위가 정상상태에 도달한 이후에 한 조석주기(12시간 25분)를 택하여, 그 때의 유속 및 조위를 기초수리자료로 이용한다. 격자의 구성은 동수력학모델과 동일하고, 계산시간간격(Δt)은 안정조건을 고려하여, 180초로 하였다. 시뮬레이션을 위한 수질항목으로는 연안해역에 있어서 대표적 수질항목인 COD, SS을 선택하였다. 만내로 오염부하는 실측된 값을 사용하였다. 확산계수는 일반적으로 연안해역에서 많이 사용하는 $1.0 \text{ m}^2/\text{s}$ 를 사용하였다. 시뮬레이션을 위한 초기농도는 해역 중앙부에서의 실측농도를 이용하여 평균값을 사용하여, COD는 1.0mg/l , SS는 6.0mg/l 으로 각각 주었다. 경계농도는 육지경계의 경우 계산영역 외의 농도를 0, 경계를 통한 물질수지는 없는 것으로 하였다. 해양경계의 경우 실측농도를 참고하여 일정한 값을 주었다. 이상의 입력조건을 요약하면 Table 8과 같다.

확산모델의 입력자료로서 오염부하량은 4가지 경우로 나누어 Table 9에 나타내었다. Case 1의 경우는 점원오염부하에 의한 확산, Case 2의 경우는 연간 비점원 원단위오염부하에 의한 확산, Case 3의 경우는 우기시 강우에 의한 비점원 원단위오염부하에 의한 확산 그리고 Case 4의 경우는 조사시 강우에 의한 비점원오염부하의 확산분포를 나타내기 위한 입력자료

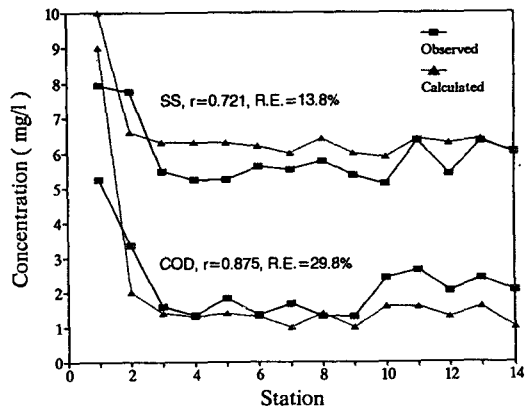


Fig. 7. Comparison of concentrations between the computed and the observed at selected stations for the ebb tide in Suyeong Bay.

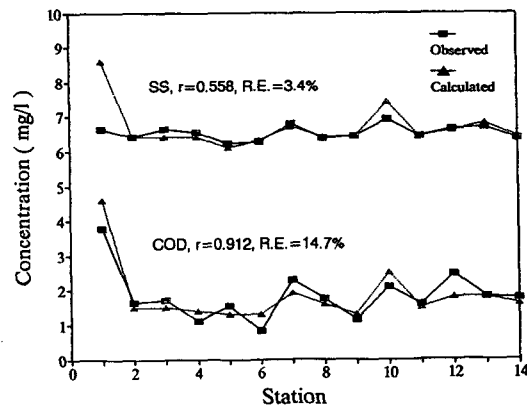


Fig. 8. Comparison of concentrations between the computed and the observed at selected stations for the flood tide in Suyeong Bay.

로 이용된다. Case 2, 3 그리고 4의 경우에는 비점원 오염부하량에 점원 오염부하량을 합하여 구하였다.

2) 확산모델 보정

연구대상지역인 수영만에 점원오염부하, 연간 비점원오염부하, 우기시 비점원오염부하 그리고 조사시 강우에 의한 오염부하로 인한 확산분포를 재현하기 위해 확산모델의 보정작업을 하였다.

보정작업은 점원오염부하량에 의한 확산현상을 반

복 시뮬레이션하여 각 하천에서 관측한 점원오염부하량이 수영만에 유입되어 이들 부하량이 해수유동에 의해 수영만에 확산된 것을 1992년 5월, 7월에 수영만 14개 정점에서 조사한 오염물 지점별 평균농도를 이용하였다. 보정작업을 한 후 재현하였을 때 실측치와 관측치를 서로 비교한 것을 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다.

Fig. 7은 낙조시 COD와 SS의 계산치와 관측치를

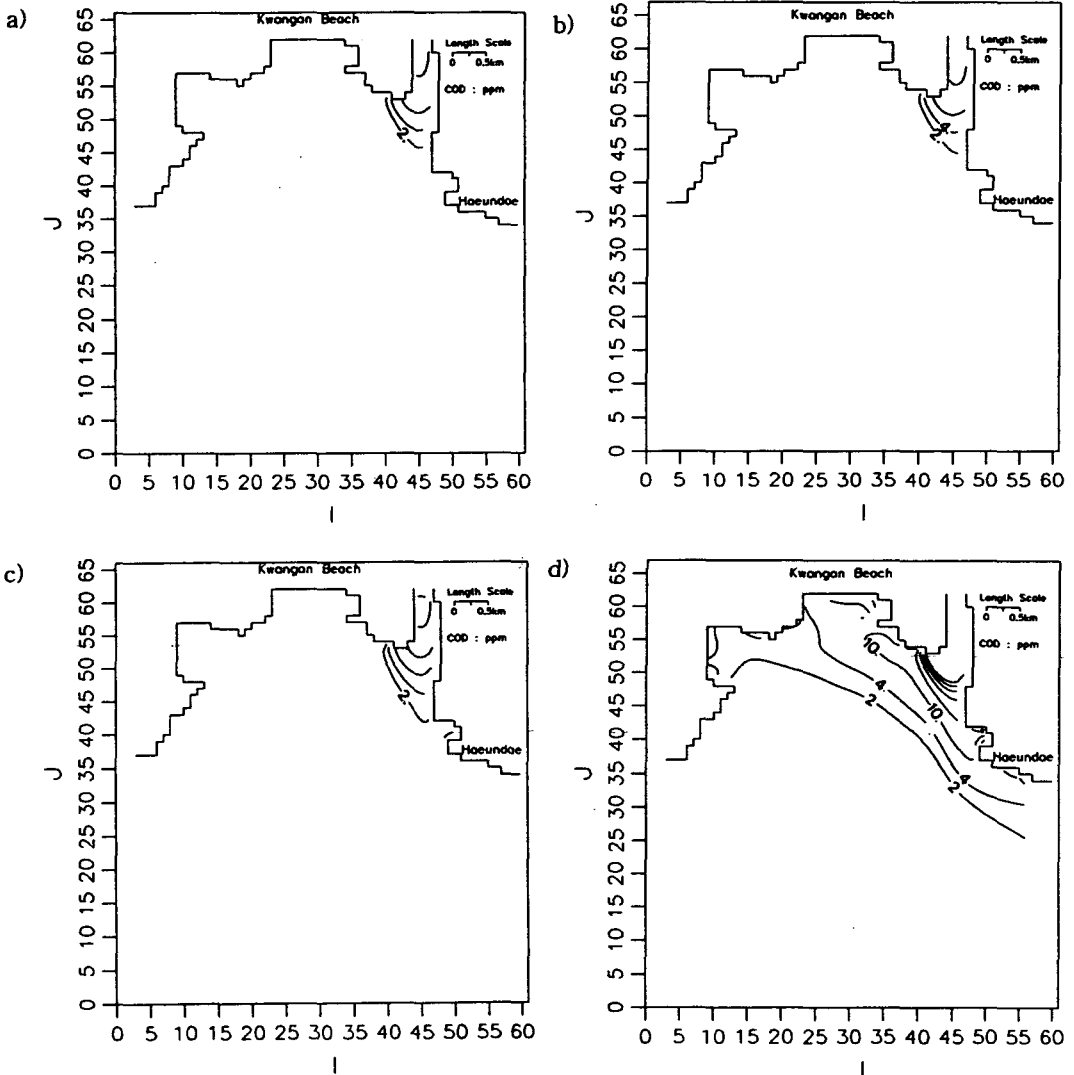


Fig. 9. Distribution of the computed COD concentration for the ebb tide in Suyeong Bay.

- a) point source pollutant loads (Case 1)
- b) annual nonpoint source pollutant loads (Case 2)
- c) nonpoint source pollutant loads during the wet weather (Case 3)
- d) nonpoint source pollutant loads during the investigation period (Case 4)

비교하여 나타냈는데 COD의 경우 상관계수는 0.875 이고 상대평균오차는 29.8%로 비교적 큰 값을 보여주었고 SS의 경우 상관계수는 0.721이고 상대평균오차는 13.8%로 비교적 낮은 상관성을 보여주었다.

Fig. 8은 창조시 COD와 SS의 계산치와 관측치를 비교하여 나타냈는데 COD의 경우 상관계수는 0.912 이고 상대평균오차는 14.7%로 매우 높은 상관성을 보여주고 있다. SS의 경우 상관계수는 0.558이고 상대

평균오차는 3.4%로 낮은 상관성과 매우 낮은 상대평균오차를 보여준다. 창조시와 낙조시 모두 St.1에서의 관측치 보다 높은 계산치를 보여주나 다른 지점에서 계산결과는 비교적 현상을 잘 재현하고 있다.

3) 확산모델의 적용

점원오염부하와 수영만 14개 정점에서 실측한 관측치로 보정한 확산모델에 비점원오염부하량을 비점원 오염부하에 의한 4가지 확산경우로 대입하여 시물

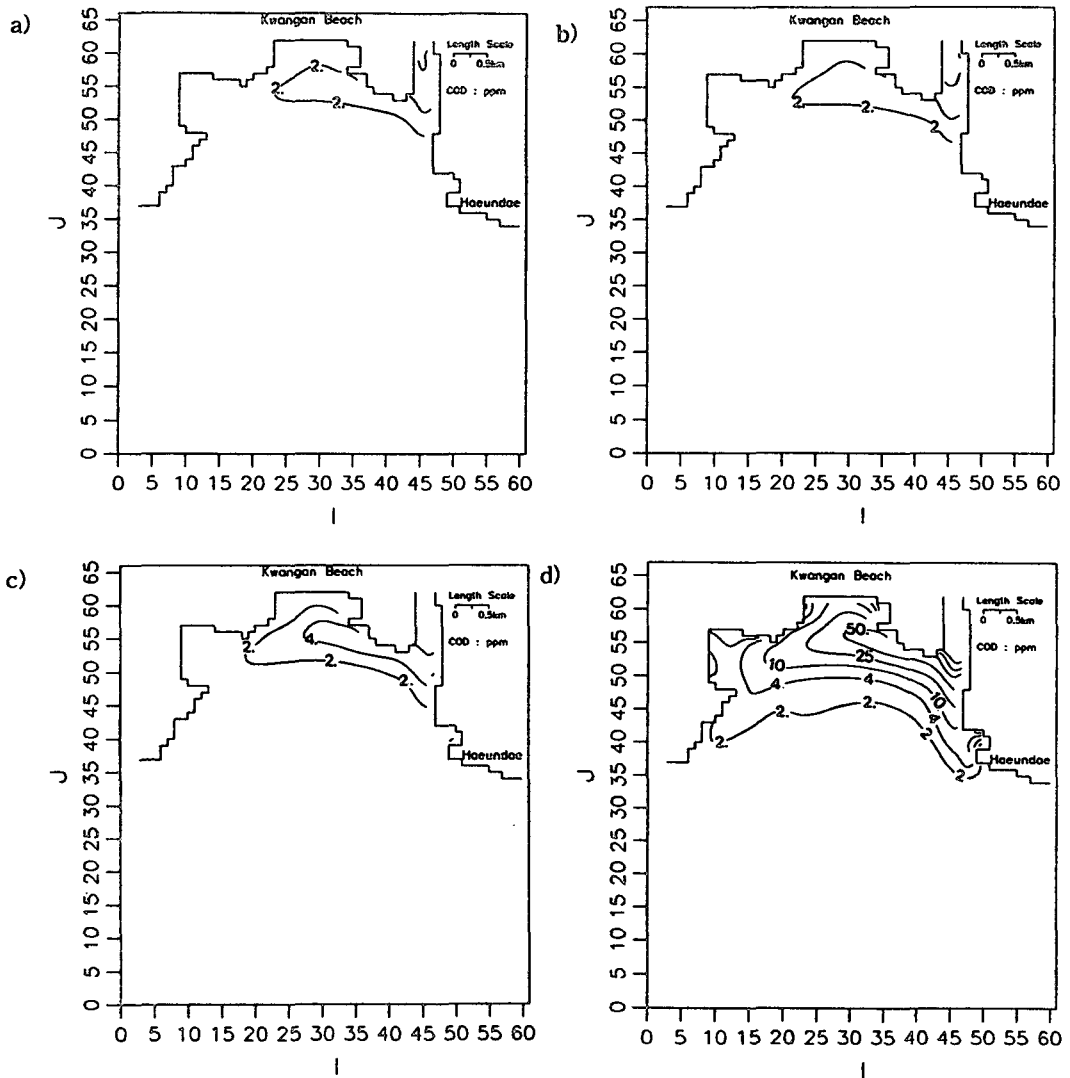


Fig. 10. Distribution of the computed COD concentration for the flood tide in Suyeong Bay.

- a) point source pollutant loads (Case 1)
- b) annual nonpoint source pollutant loads (Case 2)
- c) nonpoint source pollutant loads during the wet weather (Case 3)
- d) nonpoint source pollutant loads during the investigation period (Case 4)

레이션하였다.

(1) COD 확산분포

Fig. 9는 낙조시 COD확산분포를 4가지 경우로 나누어 점원오염부하(Case 1), 연간 비점원오염부하(Case 2), 우기시 비점원오염부하(Case 3)와 조사시 비점원오염부하(Case 4)가 수영만에 유입되었을 때 확산분포를 나타내었다.

Case 1, 2와 3의 경우는 수영강 하구에 높은 COD

확산분포를 보여주며 춘천과 대연천의 영향은 거의 미치지 못하였다. 만내의 평균수질은 1.0~2.0mg/l 그리고 수영강 하구에서는 2.0~20.0mg/l 정도를 보여준다. 그러나 강우 조사시 유출된 비점원오염부하량을 적용한 Case 4의 경우는 수영강 하구에 5.0~50.0 mg/l의 매우 높은 COD농도분포를 보여주며 오염부하는 해운대 해수욕장으로 영향을 미치는 것을 볼 수 있다. 그리고 대연천에서 유출된 오염부하는 광안리

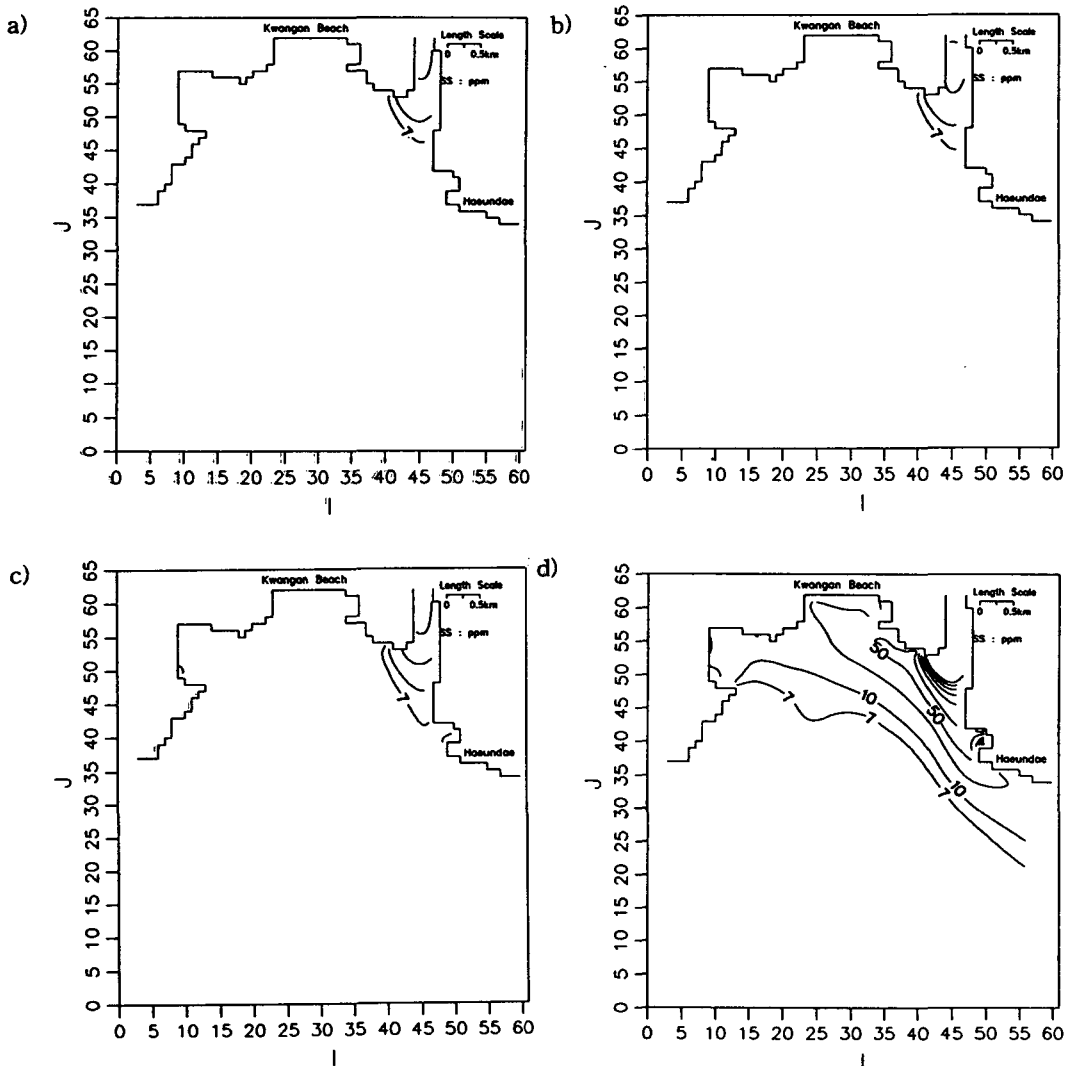


Fig. 11. Distribution of the computed SS concentration for the ebb tide in Suyeong Bay.

- a) point source pollutant loads (Case 1)
- b) annual nonpoint source pollutant loads (Case 2)
- c) nonpoint source pollutant loads during the wet weather (Case 3)
- d) nonpoint source pollutant loads during the investigation period (Case 4)

수영만 수질에 미치는 비점원 오염부하의 특성과 영향

해수욕장으로, 춘천에서 유출되는 오염부하는 해운대 해수욕장으로 영향을 미치는 것을 볼 수 있다.

Fig. 10은 창조시 4가지 COD확산분포를 나타낸 것이다. Case 1, 2와 3의 경우 수영장에서 유출되는 오염부하는 모두 광안리 해수욕장으로 확산이 되는데 Case 1의 경우 광안리 해수욕장의 농도 분포는 1.0~3.0mg/l, Case 2의 경우는 1.5~4.0mg/l 그리고 Case 3의 경우는 2.0~5.0mg/l 정도의 COD농도분포를 나타낸

다. 그리고 Case 4의 경우 수영장에서 유출되는 오염부하는 모두 광안 해수욕장으로 확산되는데 5.0~30.0 mg/l의 높은 농도분포를 보여 매우 악화된 수질 현상을 보여준다. 낙조시와 마찬가지로 춘천과 대연천에서 유출되는 오염부하량은 강우조사시에 높은 농도로 나타나며 춘천에서 유출되는 오염부하는 해수유동으로 인해 광안리 해수욕장으로 유출되어 더욱 더 광안리 해수욕장 수질을 악화시킨다.

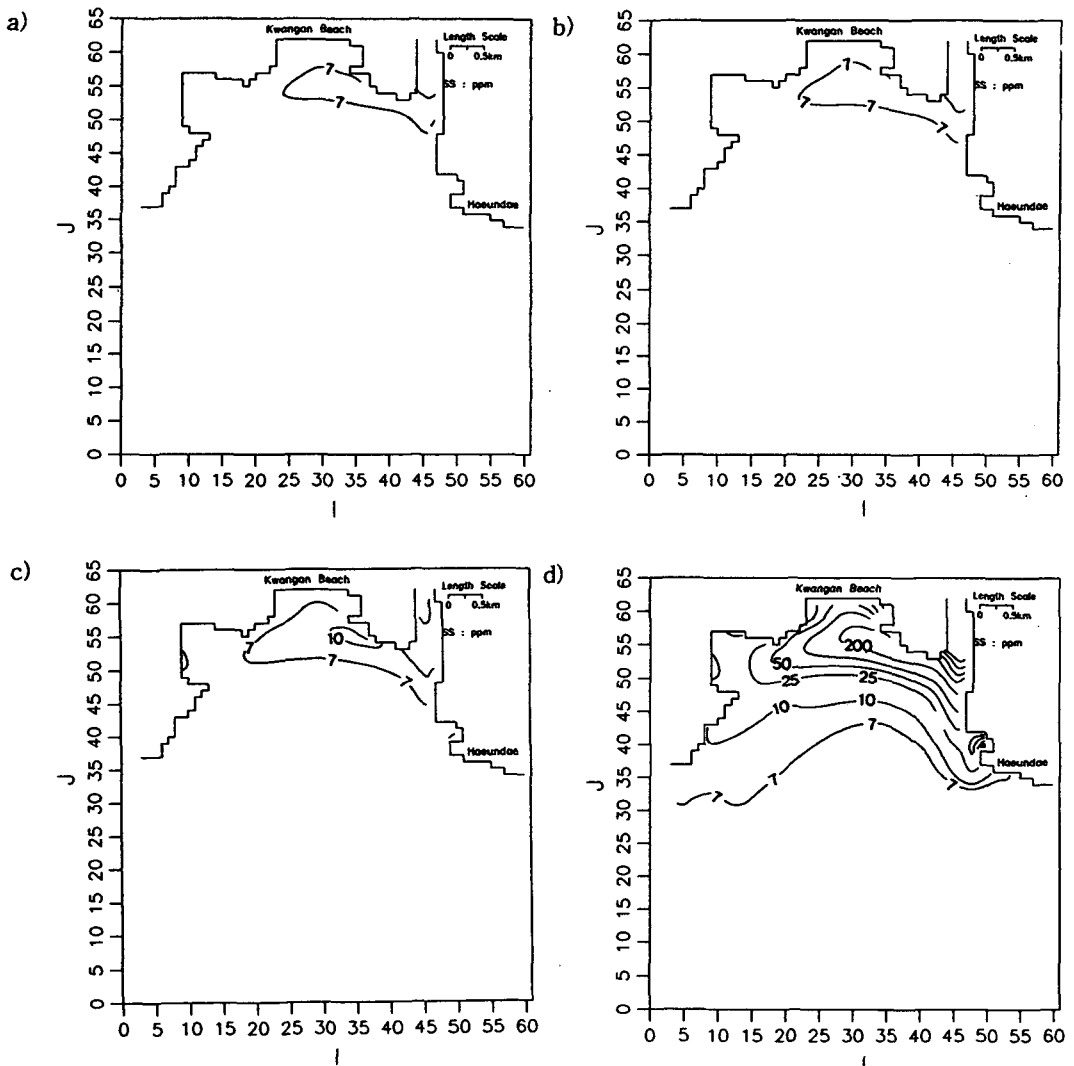


Fig. 12. Distribution of the computed SS concentration for the flood tide in Suyeong Bay.

- a) point source pollutant loads (Case 1)
- b) annual nonpoint source pollutant loads (Case 2)
- c) nonpoint source pollutant loads during the wet weather (Case 3)
- d) nonpoint source pollutant loads during the investigation period (Case 4)

(2) SS 확산분포

Fig. 11은 낙조시 SS 확산분포를 4가지 경우로 나타내었다.

4가지 경우 모두 만의 평균 농도는 6mg/l로 거의 일정하였다. Case 1, 2와 3의 경우는 수영강 하구에 높은 SS분포를 보여주며 농도분포는 각각 6.0~20.0mg/l, 6.0~30.0mg/l와 6.0~40.0mg/l의 농도분포를 보여주고 춘천과 대연천의 영향은 거의 미치지 못하였다. 강우 조사시 유출된 비점원오염부하량을 적용한 Case 4의 경우는 오염부하가 하구에서 10.0~700.0mg/l의 농도 분포로 해운대 해수욕장으로 영향을 미치는 것을 볼 수 있다. 그리고 대연천에서 유출된 오염부하는 광안리 해수욕장으로, 춘천에서 유출되는 오염부하는 수영강에서 유출되는 오염부하와 함께 해운대 해수욕장으로 영향을 미치는 것을 볼 수 있다.

Fig. 12는 창조시 4가지 SS확산분포를 나타낸 것이다. Case 1, 2와 3의 경우 수영강에서 유출되는 오염부하는 모두 광안리 해수욕장으로 확산이 되는데 Case 1, 2와 3의 경우 광안리 해수욕장의 농도분포는 각각 6.5~7.5mg/l, 6.5~8.5mg/l 그리고 6.5~9.5mg/l 정도의 SS농도분포를 나타낸다. 그리고 Case 4의 경우 농도분포는 7.0~600.0mg/l의 농도분포를 보여 매우 악화된 수질 현상을 보여준다. 낙조시와 마찬가지로 춘천과 대연천에서 유출되는 오염부하는 강우 조사시에 높은 농도로 나타나며 춘천에서 유출되는 오염부하는 해수유동으로 인해 광안리 해수욕장으로 유출되어 더욱 더 광안리 해수욕장 수질을 악화시킨다.

요 약

강우시 유출되는 비점원오염물질의 유출특성을 조사하고, 수영만에 있어서 하천오염물질이 만내로 유입되어 미치는 영향을 4가지 경우인 점원오염부하가 미치는 영향(Case 1), 연간 비점원오염부하가 미치는 영향(Case 2), 우기시 오염부하가 미치는 영향(Case 3)과 실측강우 조사기간동안 비점원오염부하가 미치는 영향(Case 4)으로 나누어 예측 및 평가하였다. 이상의 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

비점원오염물질의 특성을 보면 강우시 하천의 수질

변동은 강우강도와 유량의 증감과 매우 밀접한 관계를 가지고 증감한다. COD, TSS와 VSS의 경우는 2차 강우 후 유량이 최대인 65.736m³/s가 될 때 오염물질의 최대치가 나타났는데 최대치는 각각 121.4mg/l, 1148.0mg/l와 262.0mg/l를 보여주었다. 그리고 영양염류인 경우는 1차 강우가 시작되어 유량이 1차 최대치인 4.686m³/s로 증가할 때 최대치를 보여주는데 TIN, NH₄⁻-N, NO₂⁻-N과 PO₄³⁻-P는 각각 20.306mg/l, 14.154mg/l, 9.571mg/l와 1.785mg/l를 나타내며 2차 강우가 시작된 후 약간 증가하다가 감소하였다.

해수유동모델에 의한 결과를 보면 만내 유향은 낙조시에 시계방향으로 창조시에 반시계방향으로 북동-남서방향이다. 만내 조류속은 최대 0.3m/s이고 만의 유속은 0.4m/s 정도이며 계산치는 관측치와 매우 유사하게 재현되고 있다.

확산모델의 보정은 점원오염부하량이 만내에 미치는 영향을 수영만내 관측치를 이용해 반복 시뮬레이션하여 보정하였고 보정결과 COD, SS의 계산 결과는 관측치와 잘 일치하였다.

확산모델의 적용결과 수영강의 오염부하는 낙조시에는 해운대 해수욕장으로 창조시는 광안리 해수욕장으로 수질을 악화시켰다.

비점원오염부하가 만내에 미치는 영향을 재현시킨 결과 연간 강우로 인한 비점원오염부하(Case 2)와 우기시 강우로 인한 오염부하(Case 3)가 미치는 영향은 점원오염부하(Case 1)가 만내 수질이 미치는 영향과 비교해 광안리 해수욕장의 오염부하를 약간 증가시키며 큰 차이는 보이지 않았다.

강우 조사시 비점원오염부하가 미치는 영향(Case 4)은 수영만내에 매우 심각한 오염현상을 보여준다. 낙조시에는 COD와 SS의 만내의 농도 분포는 각각 2.0~30.0mg/l와 7.0~200.0mg/l를 보여준다. 낙조시에는 창조시보다 낮은 오염정도를 나타내나 해운대 해수욕장으로는 높은 오염을 가중시키는 것을 볼 수 있다. 그러나 강우가 멈춘 후 24시간이 경과하여 실측한 수영만의 오염분포를 보면 건기시 해역농도에 비해 약간 높은 농도분포를 보여 주는 것으로 보아 입자가 큰 침강성 고형물질의 빠른 침강과 수영만내 해수유동으로 인해 빠르게 확산되어 농도가 감소되는 것으로 보인다.

그러나 강우가 시작한 후 매우 높은 오염물질을 합

유하는 강우유출수가 만내로 유입될 때의 충격부하는 수영만의 해양생태계에 심각한 영향을 미치리라 예상되며 만약 이들 강우유출수를 처리하여 만내로 유출시키면 만내 수질은 개선되리라 사료된다.

參 考 文 獻

Choi, W. J. 1986. Effects of nonpoint pollution on water quality of streams. MS thesis, Department of Environmental Engineering, National Fisheries University of Pusan, pp. 1~44 (in Korean).

Chun, C. M. 1987. A study on water quality characteristics and water quality model in Suyeong Estuary. MS thesis, Department of Environmental Engineering, National Fisheries University of Pusan, pp. 1~96 (in Korean).

Jung, Y. C. and S. J. Yoa. 1992. Numerical modelling on hydrodynamics and diffusion in Suyeong Bay. J. Kor. Fish. Soc., 25(2), 133~143 (in Korean).

Kim, C. K. and J. S. Lee. 1991. Numerical experiments on the hydrodynamic and diffusion in estuary by using two-level Model. J. Kor. Fish. Soc., 24(1), 59~68 (in Korean).

Lee, Y. H. 1982. Characteristics and distribution of municipal wastewater discharge into the Suyeong Bay. MS thesis, Department of Environmental Engineering, National Fisheries University of Pusan, pp. 1~67 (in Korean).

Leendertse, J. J. 1971. A water-quality simulation model for well mixed estuaries and coastal Seas: Vol. 2. Computation procedures. Rep. R-708-NYC, The Rand Corp., Santa Monica, California, 1~15.

Park, B. J. 1982. A study on the nonpoint pollutant loadings with runoff in Korea. MS thesis, Department of Civil Engineering, Korea University, pp. 1~89 (in Korean).

1995년 4월 17일 접수

1995년 5월 31일 수리