

하수처리수 재이용에 따른 하천과 해역의 환경복원 및 수질관리 모델링

이 대 인 · 윤 양 호 · 박 일 훈 · 이 규 형 · 조 현 서 ·

전남대학교 수산과학연구소, 전남대학교 해양기술학부

(2006년 12월 26일 접수; 2007년 3월 15일 채택)

Environmental Restoration and Water Quality Management Modeling of Coastal Area by Reuse of Treated Wastewater

Dae-In Lee, Yang-Ho Yoon¹, Il-Heum Park¹, Gyu-Hyong Lee¹ and Hyeon-Seo Cho²

¹The Fisheries Science Institute, Chonnam National University, Jeollanam-do 550-749, Korea

²Faculty of Marine Technology, Chonnam National University, Jeollanam-do 550-749, Korea

(Manuscript received 26 December, 2006; accepted 15 March, 2007)

This study estimated response of water quality and pollutant behavior according to the discharge and reuse of treated wastewater by three-dimensional eco-hydrodynamic model, and suggest plan that water quality management and environmental restoration in the coastal area including urban stream of Yeosu, Korea. Dispersions of low-saline water and COD by treated wastewater loads (design facility capacity, about 110,000 m³/d) were very limited in near of effluent site. Nutrients, however, increase compared to the other water quality factors, especially total nitrogen was very sensitive to input loads. When reuse some of treated wastewater to Yeondeung stream, nitrogen was big influence on estuarine water quality. Although current characteristics of treated wastewater such as discharge and water quality were negligible to the change of marine environment, effluent concentration of COD, TN and TP, especially 40% of TN, are reduced within the allowable pollutant loads for satisfy environmental capacity and recommended water quality criteria. Also, controls of input point/non-point sources to Yeondeung stream and base concentration of pollutants in coastal sea itself are very necessary.

Key Words : Treated wastewater, Eco-hydrodynamic model, Water quality management, Environmental restoration, Coastal area of Yeosu, Yeondeung stream

1. 서 론

최근 물관리 정책에 있어서 하천이나 해역으로 방류하던 하수처리장 방류수(하수처리수)를 도시 유지용수, 공업용수, 농업용수, 하천유지용수, 여가 용수와 복합용수 등의 용도로 공급하여 새로운 수자원으로 이용하는 하수처리수 재이용 촉진 시범 사업이 추진되고 있다. 특히, 자정능력이 감소되어 수질오염이 심화되고 수량부족에 따른 친수공간의 기능이 저하된 도시하천에 건천화 방지와 기능회복을 위해서 하수처리수를 유지용수로 활용하는 사례는 풍부한 유량을 안정적으로 확보할 수 있다

는 장점과 댐 건설 등과 같은 방법에 비해 사업비가 적게 들어서 수질과 수량 만족을 동시에 도모하는데 있어서 많이 고려되고 있다¹⁻³⁾. 그러나 수질적 측면에서 하천이나 해역에 미치는 영향을 최소화하기 위해서 하수처리수의 수질개선이 선결되어야 하는 문제를 안고 있다.

본 연구의 초점이 되는 여수지역의 연안은 Fig. 1과 같이 환경관리해역인 가막만 등을 포함하고 있어서 수산양식 그리고 자연환경적 차원에서 해양오염의 관리와 청정해역의 유지방안이 필요한 실정인데^{4,5)}, 최근까지 가막만 북서쪽 내만과 여수항 인근해역 등에서 오염이 심화되었고, 특히 도심을 가로지르는 자연하천인 연동천은 생활하수를 포함해서 큰 오염부하특성을 보여 왔다^{6,7)}. 연동천은 여수시 둔덕동 호랑산에서 발원하여 여수 시가

Corresponding Author : Hyeon-Seo Cho, Faculty of Marine Technology, Chonnam National University, Jeollanam-do 550-749, Korea
Phone: +82-61-659-3146
E-mail: hscho@chonnam.ac.kr

지를 관류한 후 가막만 북부해역으로 유입되는 지방2급 하천으로 유역면적 16.65 km², 하천연장 6.13 km, 유로연장 8.79 km, 그리고 평균 하상계수는 약 7,000 정도로서 상류유역은 농경지로 조성되어 있고, 하류유역은 생활하수에 의한 수질오염이 심각하였다. 하계 연동천의 월평균 유출량은 84,095.9 m³/d, 연간 유출량은 13.90×10⁶ m³/yr, 평균 갈수량은 0.028 m³/s 그리고 유지유량은 0.031 m³/s 정도이다^{8,9)}. 2003년 조사자료에 의하면 BOD는 5.8-20.4 ppm, TN은 5.452-14.471 ppm, 그리고 TP는 0.602-2.005 ppm으로 하류지역으로 갈수록 오염농도가 증가하여 하천수질기준 5등급 이하의 수질을 나타내었다⁹⁾. 그러나, 2005년 연속회분식활성슬러지법(MSBR공법)과 사여과시설을 갖추고 시설용량 일일 11만톤인 하수종말처리장이 완공·자동함에 따라서 연동천의 오염이 서서히 감소되고 있는 상태이다. 2005년 4월에 조사한 결과, 연동천 최하류 지점의 BOD는 약 4.6 ppm, COD는 13.1 ppm, TN은 8.049 ppm, 그리고 TP는 0.688 ppm으로 이전에 비해 수질이 매우 향상된 것으로 나타났으나, 여전히 수질개선의 필요성이 제기되고 있다. 현재, 여수하수처리장은 지역에서 발생된 하수를 약 45% 정도 차집하고 있고, 2005년도 방류수의 평균수질은 BOD 3.48 ppm, COD 6.78 ppm, SS 1.78 ppm, TN 7.82 ppm 그리고 TP 0.91 ppm 정도로 법적 수질기준인 BOD 20 ppm 이하, COD_{MN} 40 ppm 이하, SS 20 ppm 이하, TN 60 ppm 이하 그리고 TP 8 ppm 이하와 비교하면 매우 낮다. 그럼에도 불구

하고, 하수종말처리수의 방류구 인근해역은 수질이 다소 저하되고, 오염물질에 의한 확산 영향이 예측되고 있는 실정이다.

이러한 배경하에서 최근 환경부는 하수처리수 재이용의 정책에 있어서 연동천의 하천기능 회복을 위해 하천유지용수 시범사업지역으로 본 연구지역을 선정하여 추진하고 있다. 대부분 하수처리수 재이용을 위한 연구는 처리공법과 오염물질 제거 등 기술공학적 측면에서 많이 접근되고 있고, 최근에는 하천유지유량 확보방안과 하천수질의 관리에 관한 연구 등이 진행되었다^{10,11)}. 그러나, 하수처리수 재이용에 관한 충분한 수질기준이 정립되지 않은 상태에서서 권고기준을 가지고 해역으로 배출하고 있는 하수처리수 일부를 유지용수 및 생태기능 회복차원에서 하천으로 방류했을 경우에 하천 하류(하구) 및 인근해역에 미치는 환경영향과 수질응답에 관한 예측 연구는 매우 부족하다. 또한, 아울러서 하수처리수를 해역으로 방류했을 경우에도 연안해역에 미치는 영향에 관한 심도있는 평가도 선행되어야 한다.

따라서 본 연구는 여수 하수종말처리장의 처리수를 인근해역의 최종방류구로 배출시켰을 경우와 그리고 그 일부를 연동천으로 재이용하기 위해 하천상류에 배출시켰을 경우에 따른 저염수 확산과 수질을 예측 평가하고, 해역환경과 하천환경의 피해 최소화와 환경복원을 위한 하수처리수의 정성적/정량적 삭감량(또는 허용오염부하량)을 산정하여 효율적인 수질관리방안을 제시하였다.

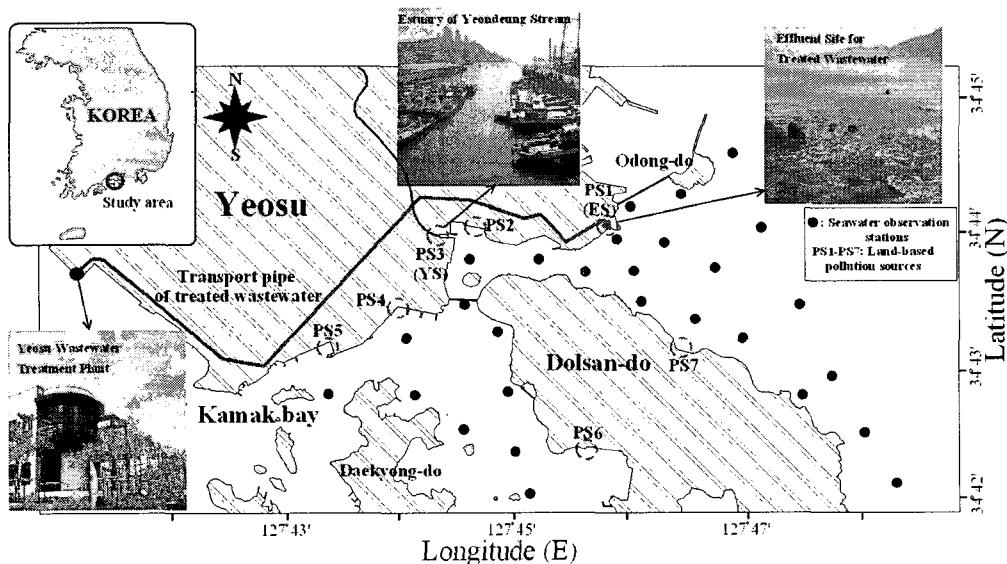


Fig. 1. The study area and sample sites in Yeosu of South Korea, including estuary and effluent site of treated wastewater.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구지역 육상 유입원 및 해양환경 조사

연구지역의 해양환경특성을 파악하기 위해서 Fig. 1에 나타낸 지점에서 2005년 9월에 조사를 실시하였으며, 수온, 염분과 밀도 (σ_t)는 CTD (SBE-19형)로 현장에서 관측하였고, COD, TN, TP와 대장균 등은 해양환경공정시험방법¹²⁾으로, 그리고 식물플랑크톤은 Chihara와 Murano¹³⁾ 및 Tomas¹⁴⁾에 의거해서 분석하였다. 또한, 해역으로 유입하는 오염부하량을 산정하기 위해서 하수처리수와 연동천 등을 포함한 주변의 육상 유입원에 대해서 2005년 9월에 시료를 채수하여 수질오염공정시험방법¹⁵⁾에 따라 분석하였고, 하수처리수의 방류량 자료는 하수처리장에서 직접 획득했고, 나머지 각 유입원의 유량은 단면적과 유속을 실측하여 산정하였다.

2.2. 환경예측과 관리를 위한 모델의 개요

연구지역에서 하수처리수 배출에 따른 저염분화산과 수질예측 시뮬레이션을 위해서 국내외의 해역에서 많이 적용하여 검토된 생태-유체역학 모델 (Eco-Hydrodynamic Model)을 이용하였다¹⁶⁻¹⁸⁾. 본 모델은 해수유동 시뮬레이션을 위한 층계모델 (Multi-level Model)과 수질 시뮬레이션을 위한 생태계모델 (Ecological Model)로 구성되어 있다. 해

수유동모델을 이용하여 조석류와 잔차류를 시뮬레이션하고, 조석잔차류, 취송류와 하천유입에 의한 밀도류로 구성된 잔차류 성분을 생태계모델의 유동장으로 입력하여 수질을 예측한다.

2.2.1. 모델링 격자 구축과 입력자료

모델의 격자영역은 Fig. 1을 바탕으로 X방향으로 171개, Y방향으로 80개, Z방향으로는 수온약층 등을 고려하여 3층으로 격자망을 구성하였고, 하나의 격자크기는 계산의 효율성과 방류구 주변 해역의 공간크기를 고려하여 100 m로 하였다. 본 연구는 하구 및 해역모델링에 초점을 두어서 연동천은 최하단부인 하구지역만 격자시스템에 포함하였다.

모델영역내의 해수유동을 재현하기 위해서 입력한 자료는 Table 1과 같다. 수심은 수치해도 NO. 251과 256 등을 참조하였고, 개방경계에서는 조석의 주요 4대 분조인 M_2 , S_2 , K_1 및 O_1 을 고려하였고 각 분조의 조위와 위상 값은 한국해양연구소¹⁹⁾와 여수시²⁰⁾ 등을 참조했다. 수온, 염소량 등 초기값과 경계는 실측값과 여수시²¹⁾ 등의 문헌조사를 통해서 적용하였다. 기존 연구 등을 참조하여 해저마찰계수는 일반적으로 해의 안정성을 주는 0.0025, 수평확산계수는 $1.5 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{sec}$, 연직확산계수의 경우는 1층에서 3층까지 $0.1 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 를 적용하였고,

Table 1. Input data for the hydrodynamic model

Parameters and forcing		Input values
Grid information		Applied Arakawa C-Grid $\Delta x = \Delta y = 100 \text{ m}, 171 \times 80$
Level		1: 0-3 m, 2: 3-8 m, 3: below 8 m
Total simulation time		10 tidal cycles
Calculation time step		2 sec
Tidal harmonics at open boundary (M_2 , S_2 , K_1 and O_1)		Refer to Reference 19) and 20)
Initial and open boundaries values of water temp. and sal.		Water temp.: 22.00°C-24.00°C Sal.: 31.00-32.00
Horizontal viscosity and diffusion coefficient		Level 1-3: $1.5 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$
Vertical diffusion coefficient		Level 1-3: $0.1 \text{ cm}^2/\text{s}$
Bottom friction coefficient		0.0025
Wind	Summer prevailing wind: SSW 3.6 m/s	
Sources		Values
PS1	Mean discharge	$43,000 \text{ m}^3/\text{d}$
	Design capacity	$110,000 \text{ m}^3/\text{d}$
	Reuse to Yeondeung stream	$12,000 \text{ m}^3/\text{d}$
PS3	Low flow or In-stream flow	0.03 CMS
	Observed discharge	0.27 CMS
PS4	Observed discharge	0.02 CMS
PS5	Observed discharge	0.08 CMS
Major freshwater input sources (Observed date: Sep, 2005)		

또한 Coriolis coefficient가 위도에 따라서 일정한 f-plane을 이용하였다. 육상의 점오염원은 하수처리장 배출수, 연동천 및 주변 하천과 오수구 등을 고려하였고, 유량 및 오염부하량은 여수하수처리장의 자료와 실측 조사한 값 등을 이용하였다. 또한, 대기-기상조건 등의 자료는 여수시⁸⁾를 참조하였다. 생태계모델에 사용된 대표적인 입력인자 및 파라메

터들은 실측하거나 각종 문헌조사한 값^{22,23)}을 이용하였고, 대표적인 데이터를 Table 2에 나타내었다.

2.2.2. 시뮬레이션 시나리오

시뮬레이션 초기은 오염물질인 COD, DIN, TN, DIP와 TP를 주 대상으로 하였다. COD는 BOD의 대체수단으로 수중 산소를 소비하는 유기물질 함량의 간접지표로 이용되며, 해역에서는 육상에서의

Table 2. Input data for the ecological model

Parameters	Input values		
Total simulation time	50 days		
Simulation time interval	50 sec		
Initial values for compartments	DO (mg/L)	6.0-7.0	POC (mgC/m ³)
	COD (mg/L)	2.0	DOC (mgC/m ³)
	DIP (μM)	0.5	PHYTO (mgC/m ³)
	DIN (μM)	5.0	ZOO (mgC/m ³)
Boundary values for compartments	DO (mg/L)	5.0-7.5	POC (mgC/m ³)
	COD (mg/L)	1.2-4.0	DOC (mgC/m ³)
	DIP (μM)	0.4-1.5	PHYTO (mgC/m ³)
	DIN (μM)	3.5-8.0	ZOO (mgC/m ³)
Horizontal viscosity and diffusion coefficient	Level 1-3: 1.5E5 (cm ² /s)		
Major atmospheric conditions	Maximum light intensity: 632.1 cal/cm ² /day		
	Length of day: 0.5 day		
Major biological parameters	Maximum growth rate of phytoplankton at 0°C: 1.25 day ⁻¹		
	Respiration rate of phytoplankton at 0°C: 0.01 day ⁻¹		
	Death rate of phytoplankton at 0°C: 0.03 day ⁻¹		
	Maximum grazing rate of zooplankton at 0°C: 0.18 day ⁻¹		
	Natural death rate of zooplankton at 0°C: 0.05 day ⁻¹		
	Mineralization rate of POC at 0°C: 0.085 day ⁻¹		
	Mineralization rate of DOC at 0°C: 0.002 day ⁻¹		
	Half saturation constant for uptake of PO ₄ ³⁻ at 0°C: 0.024 μM		
	Half saturation constant for uptake of DIN at 0°C: 0.250 μM		
	C/Chl. a: 31		
Pollutant concentration of the major point sources (Pollutant loads: Discharge of input source × Pollutant conc.)	Sediment fluxes, NH ₄ ⁺ : 100 mg/m ² /d, PO ₄ ³⁻ : 10 mg/m ² /d		
	Sources	COD (mg/L)	DIN (mg/L)
	PS1	9.40	6.73 (TN: 9.62)
	PS3	5.00	4.42
	PS4	4.42	7.25
	PS5	2.17	21.21
			0.99 (TP: 1.42)
			0.66
			0.48
			0.35

하폐수에 의한 유입과 영양염 섭취로 인한 해역 자체의 식물플랑크톤의 성장 등에 기인되어 고농도를 나타낼 수 있다. 우리나라 해역수질환경기준 I 등급은 1 mg/L 이하, II등급은 2 mg/L 이하, III등급은 4 mg/L 이하로 설정되어 있다. 한편, 영양염류는 부영양화 또는 적조현상과 관련되는 식물플랑크톤의 성장에 주로 관련되며, 제한인자로는 무기질소와 인을 많이 고려하고 있다. 이러한 질소와 인은 육상에서 하폐수 등에 의해 유입될 수 있고, 또한 오염된 퇴적물에서 용출될 수 있다. 우리나라 해역수질환경기준을 살펴보면, I 등급은 TN 0.3 mg/L 이하와 TP 0.03 mg/L 이하, II등급은 TN 0.6 mg/L 이하와 TP 0.05 mg/L 이하, III등급은 TN 1.0 mg/L 이하와 TP 0.09 mg/L 이하이다. 한편, 본 연구지역은 여수항을 포함한 연동천 하류 인접해역은 해역수질환경기준 III등급으로 설정되어 있으며, 그 외의 가막만 북부해역과 여수해만 지역은 II등급으로 설정되어 있다. 일반적으로 수질예측과 평가를 위한 시뮬레이션시 기준시점은 수질이 가장 악화될 수 있는 하계에 초점을 맞추며, 이러한 배경을 고려하여 본 연구에서는 하계에 하수처리수 유입과 오염부하량 변동에 따른 해역의 응답성 (저염분 확산과 수질변화)과 영향권 범위를 검토하였다. 보정-검증이 검토된 해수유동과 생태계모델을 이용해서 하수처리수 방류량과 재이용량에 따른 연안해역의 염분확산 및 수질 시뮬레이션을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 육상 유입원과 해역 환경

연구지역 주 오염원의 수질조사결과를 살펴보면 (Table 3), TSS는 2.00-86.57 mg/L 범위로 중앙동 오수유입구에서 최대값을 나타내었고, 하수처리수는 약 4.30 mg/L로 배출수의 법적기준인 20 mg/L 이하를 나타내었다. COD는 1.77-48.46 mg/L 범위로 중앙동 오수유입구에서 최대값을 나타내었고,

하수처리수는 9.40 mg/L로 법적기준인 40 mg/L 이하보다 낮았다. TN은 5.28-56.48 mg/L 범위로 중앙동 오수유입구에서 최대값을 나타내었고, 하수처리수는 대략 9.62 mg/L를 나타내어 법적기준인 60 mg/L 이하를 만족하였다. TP는 0.10-4.00 mg/L 범위로 중앙동 오수유입구에서 최대값을 나타내었고, 하수처리수는 약 1.42 mg/L로 법적기준인 8 mg/L 이하보다 낮은 값을 나타내었다. 한편, 연동천은 COD가 5.0mg/L로 과거에 비해서 낮은 농도 값을 보였고, TN과 TP는 각각 9.30 mg/L와 0.70 mg/L로 조사되었다. 유량은 1,000-48,519 m³/d 범위로 하수처리수의 방류량이 가장 커고, 연동천은 약 23,000 m³/d로 산정되었다. 특히, 중앙동 오수유입구 및 주변에서는 다른 유입원보다 미처리된 고농도의 유기 및 무기물질들이 직접적으로 해역으로 유입되는 것으로 확인되어 이에 대한 대책이 필요할 것으로 나타났다. 하수처리수의 수질은 COD, TN 및 TP 모두 방류수의 법적기준보다 낮은 농도로 배출되고 있지만, 친수용수 재이용 권고기준 (BOD 3 mg/L 이하, TN 10mg/L 이하, TP 1mg/L 이하)을 모두 상시적으로 만족하기 위해서는 좀 더 정화해야 하는 것으로 평가되었다.

한편, 해양환경특성을 검토한 결과 (Fig. 2), 염분분포는 하수종말처리수의 배출지점 가까이에서는 30 이하의 저염수 출현과 함께 염분변화가 크게 나타났다. COD는 표층에서 0.05-3.12 mg/L의 변동범위로 평균 0.99 mg/L의 값을 보였고, 대경도 북동쪽 및 방류구 주변해역을 중심으로 2 mg/L 전후의 고농도를 나타내었다. TN은 표층에서 0.475-2.400 mg/L의 변동범위로 나타났고, 대부분의 해역에서 해역수질기준 등급 II-III을 보였으며, 방류구 주변 해역의 표층에서 높은 값을 보였다. TP는 0.014-0.310 mg/L 범위로 대부분의 해역에서 0.03 mg/L 전후의 분포를 보여 해역수질기준 등급 I-II를 나타내었다. 식물플랑크톤 현존량은 돌산대교 주변 가막만 북부에서는 60×10^4 cells/L 이상, 하수

Table 3. Water quality and discharge from land-based input sources, Sep. 2005

Input sources	Discharge	pH	Sal.	TSS	DO	COD	DIN	DIP	TN	TP
	m ³ /day		psu	(mg/L)		
PS1	48,519	7.00	1.60	4.30	7.02	9.40	6.73	0.99	9.62	1.42
PS2	1,000	6.84	-	86.57	5.00	48.16	29.05	2.66	56.48	4.00
PS3	23,169	8.40	0.10	4.00	9.63	5.00	4.42	0.66	9.30	0.70
PS4	1,470	8.15	0.10	2.00	6.09	4.42	7.25	0.48	34.98	1.03
PS5	5,710	7.73	0.00	12.43	4.38	2.17	21.21	0.35	38.91	0.94
PS6	4,280	8.17	2.30	43.00	7.55	2.53	1.83	0.06	6.01	0.10
PS7	12,496	8.12	29.90	37.00	5.42	1.77	0.52	0.04	5.28	0.14

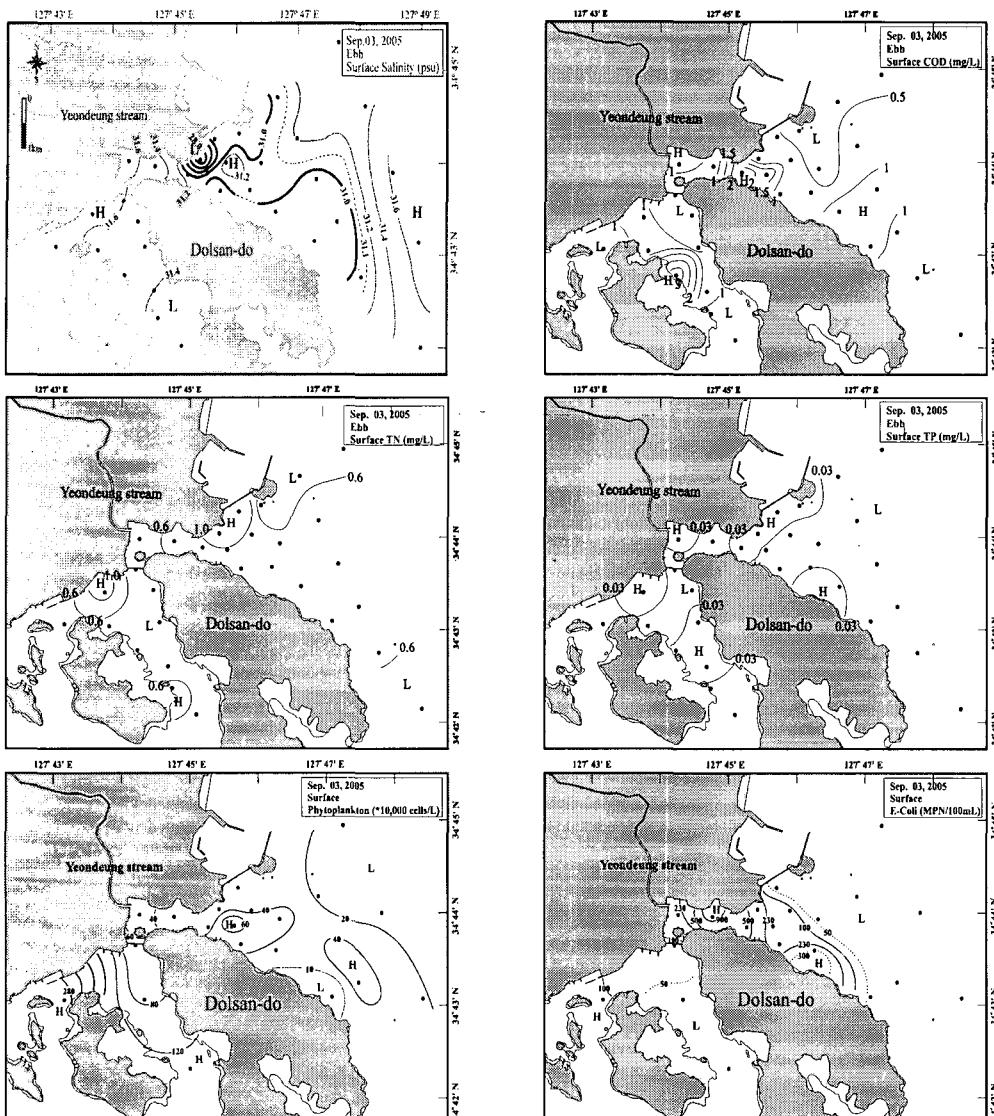


Fig. 2. Distribution of salinity, COD, TN, TP, Phytoplankton biomass and E-coli group in water column of the study area.

처리수 방류구 주변해역에서 40×10^4 cells/L 이상, 그리고 여수해만에서는 상대적으로 낮은 세포밀도를 보였고, 대장균군은 여수구항 주변 해역에서 처리되지 않은 하수 유입원의 영향으로 상대적으로 높은 분포를 나타내었다.

3.2. 모델의 검증

3.2.1. 해수유동모델의 검증과 유동장 모의

3차원 해수유동모델을 이용해서 각종 입력인자 및 파라메타 등을 조절해 가면서 연구해역에 있어서 하계 유동장을 재현하는 보정과정을 거친 후, 시뮬레이션된 조석을 검증하기 위해서 여수항에서 관측된 수위와 예측된 수위를 비교한 결과는 Fig.

3과 같이 대조기 한 조석주기 동안의 수위와 위상의 변동 패턴을 매우 유사하게 재현하는 것으로 나타났다. 또한, St. U-1 (대경도와 돌산도 사이)과 St. U-2 (돌산도 동쪽) 지점의 표층에서 획득한 대조기의 현장유속자료²⁰⁾와 계산된 동일지점의 유속성분결과를 조류분산도로 비교하였는데, 유향 및 유속의 분포가 대체적으로 유사하였다. 이렇게 보정-검증된 해수유동모델에 의해 조석류와 잔차류를 시뮬레이션한 결과, Fig. 4와 같이 창조류는 북북서류, 낙조류는 남남동류가 주류를 이루며, 창조류의 최강 유속은 약 70 cm/s, 낙조류의 최강유속은 약 80 cm/s를 나타내었다. 어떤 유입원으로부터

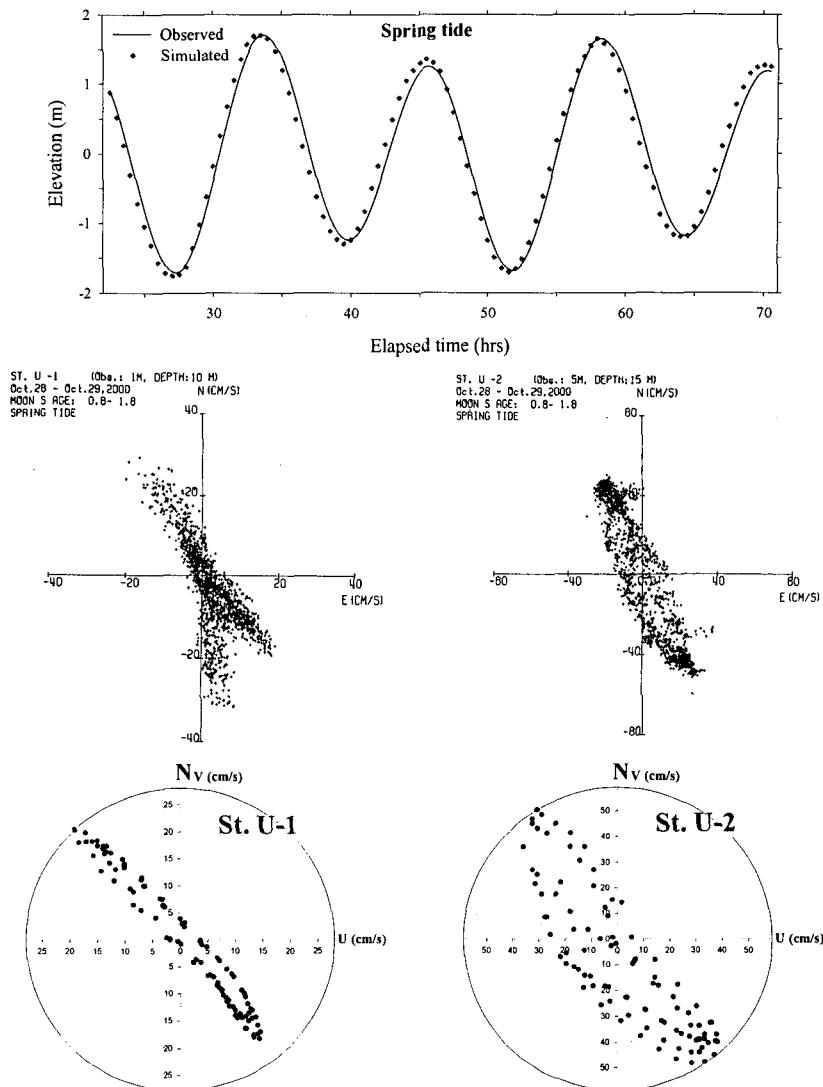


Fig. 3. Comparison of simulated and observed elevation in Yeosu harbour and tidal currents.

의 순간적인 또는 지속적인 부하에 의한 해역의 영향을 평가할 때, 평균적인 물질 분포상태와 중장기적 변동은 잔차류의 영향을 많이 받는다고 알려져 있다. 즉, 조석의 비선형성에 따른 조석잔차와 육상으로부터 유입되는 담수량 그리고 하계의 타월 풍으로 구성되는 잔차류가 매우 중요하다. 잔차류 분포를 살펴보면, 여수해만에서는 남향류 성분이 매우 강하며, 연등천 하류 해역에서는 10 cm/s 이하의 유속으로 여수해만으로 빠져 나가는 동향 성분과 미약한 남북 방향의 흐름이 존재하는 것으로 시뮬레이션되었고, 하수방류구 주변에서는 남동향 흐름이 우세한 것으로 나타났다. Fig. 5는 하수처리수 방류전후 대조기 최강 창조류시와 낙조류시 유속변화량을 나타내는데, 창조시에는 밀물로 인하

여 방류수의 영향이 거의 나타나지 않지만, 낙조시에는 ± 0.1 cm/s 이상 유속이 변화한 해역은 약 4 ha 정도로 계산되었다.

3.2.2. 생태계모델의 검증

해수유동모델에서 계산된 잔차류를 생태계모델의 유동장으로 입력해서 각종 입력인자 및 파라메터를 조절해 가면서 해역의 하계 수질상황을 보정하였다. 예측한 COD, DIN, DIP 값과 실측 값을 비교해서 모델을 검증한 결과, Fig. 6과 같이 COD, DIN과 DIP의 결정계수가 각각 0.8170, 0.7340과 0.7923으로 시·공간적으로 환경변화가 심한 하계의 수질상황을 감안하면 대상해역의 수질분포를 매우 잘 재현하는 것으로 판단되었다.

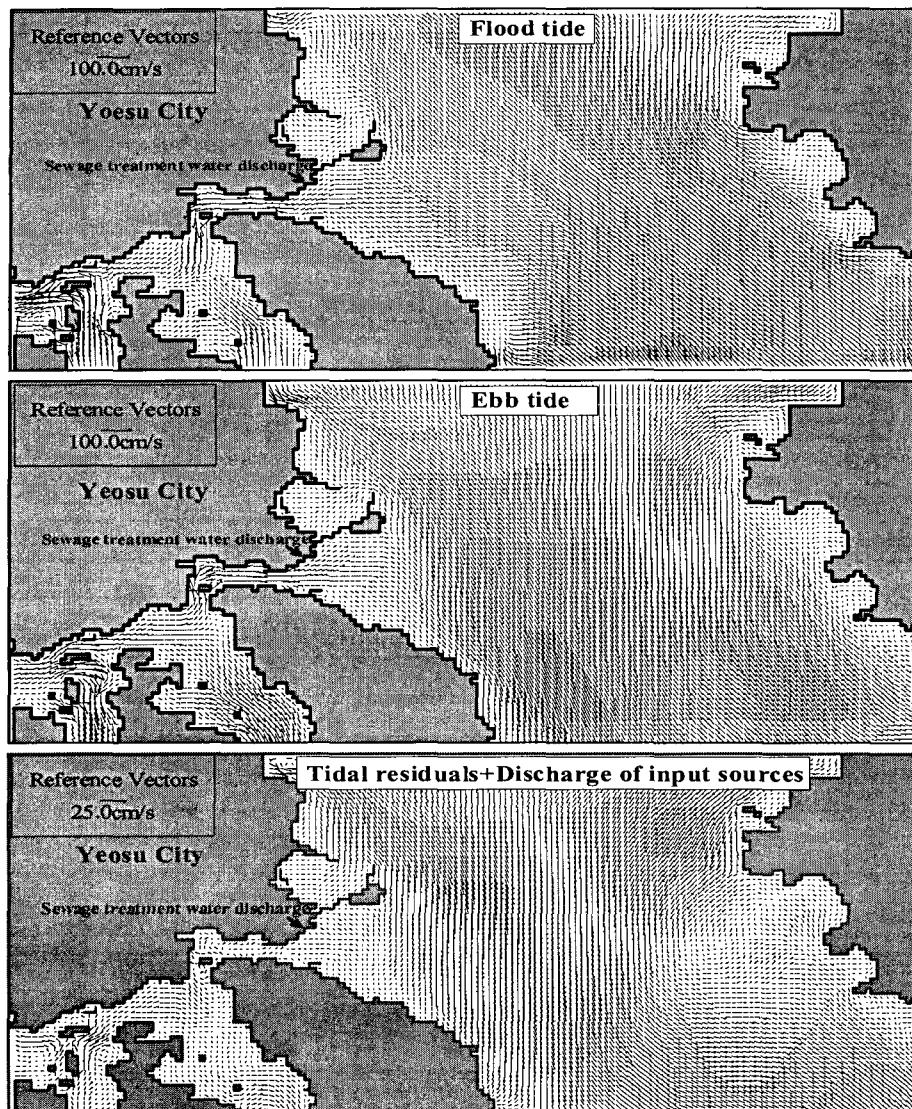


Fig. 4. Distribution of tidal currents and residual currents in the study area.

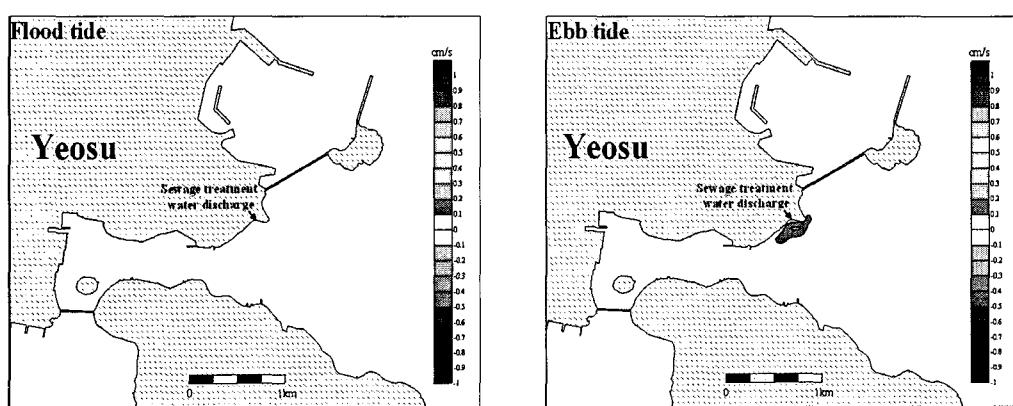


Fig. 5. Variation of current velocity by discharge of treated wastewater.

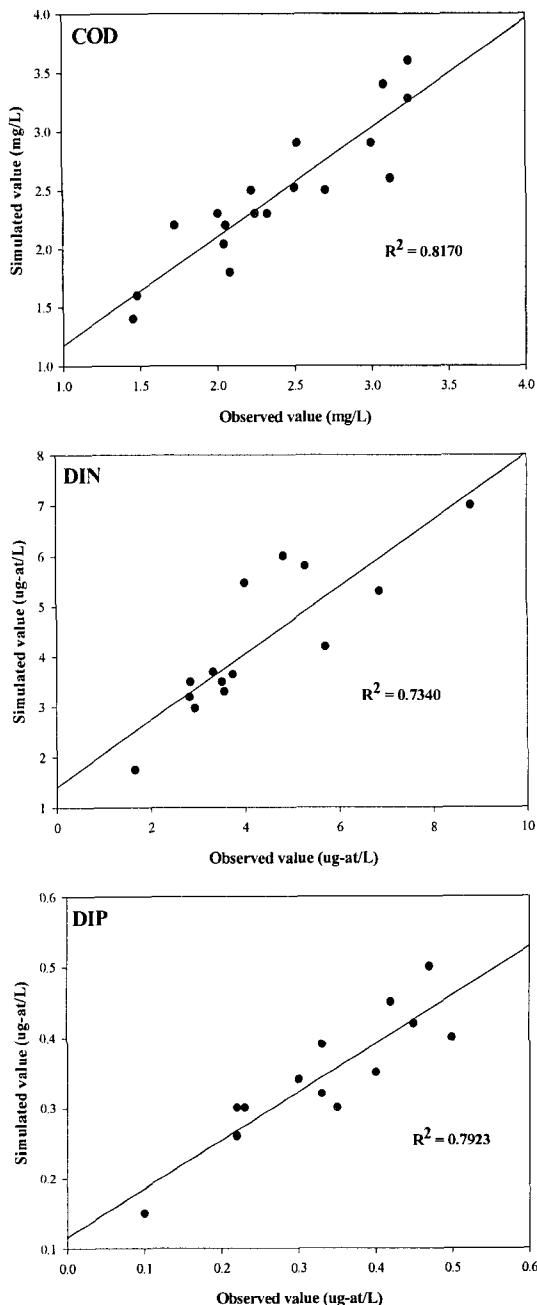


Fig. 6. Comparison of simulated and observed COD, DIN and DIP at surface in the study area.

3.3. 저염확산 시뮬레이션

하수처리수가 해역으로 유입되었을 때, 저염수가 어느 정도까지 영향을 미치는가를 알아보기 위해서 Fig. 7과 같이 하수 최종방류구와 연동천 하구를 중심으로 비교정점을 설정해서 염분의 표층 확산 시뮬레이션을 실시하였다. Fig. 8과 같이 하수

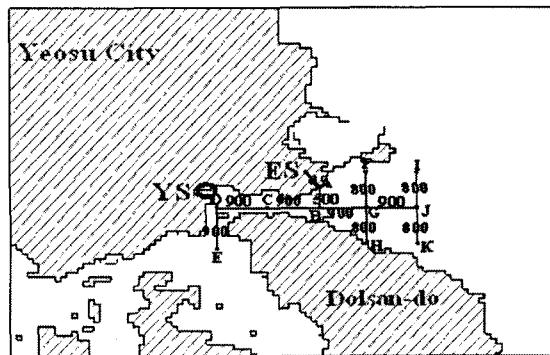


Fig. 7. Comparison stations for response to water quality by simulation. Values are distance of each of the stations (m).

처리수 유입이 없을 경우, 표층 염분은 약 30.70–31.70 psu 범위로 가막만과 여수해만 내측으로 갈수록 다소 감소하였으며, 반대로 여수해만 외측으로 갈수록 증가하는 양상을 보였다. 현재 하수처리수 평균 방류량인 약 43,000 m³/d이 유입되면 최종방류구 인근 지점에서는 저염수가 다소 확산되지만 그 폭은 매우 작았고, 일평균 110,000 m³/d의 하수처리수가 유입되면, 최종방류구를 중심으로 1 km 내에서 최대 0.2 psu 정도의 염분감소가 예측되어서 저염수 확산은 거의 없는 것으로 판단되었다. 연동천의 평균 갈수량 또는 유지유량 조건인 0.03 m³/s (약 2,592 m³/d)가 해역으로 유입되면, 건천 조건과 거의 동일한 분포로, 염분 차는 거의 나타나지 않았다. 건기시 하수처리수 약 43,000 m³/d 중 연동천으로 하수를 12,000 m³/d 정도 유입시키면 연동천 하류해역에 염분감소가 다소 나타나지만, 이 경우 저염분의 확산과 영향은 미미한 것으로 나타났다. 하수처리수 재이용량을 43,000 m³/d로 증가해도 다소의 염분 농도 감소가 나타나지만, 그 폭은 대부분 0.2 psu 이하로 매우 좁게 나타났다.

3.4. 수질오염물질 확산 시뮬레이션

유입원의 유량과 오염물질의 농도가 변하면 오염부하량 역시 변동된다. 따라서 본 연구에서는 하수처리수의 방류량 변동과 처리수의 수질, 즉 오염물질의 농도변화에 따른 해역의 하계 COD, DIN과 DIP 등의 농도분포와 확산을 평가한 결과를 Fig. 9–11에 제시하였다.

하수처리수의 유입이 없을 때, 하수방류구 전면 해역의 COD는 약 2.4–2.6 mg/L 범위로 여수해만 쪽으로 갈수록 점차 감소하였다. 가막만은 여수해만보다 상대적으로 높은 COD 농도를 보였는데, 연동천 하류해역 및 대경도와 돌산도 사이에서 3.0

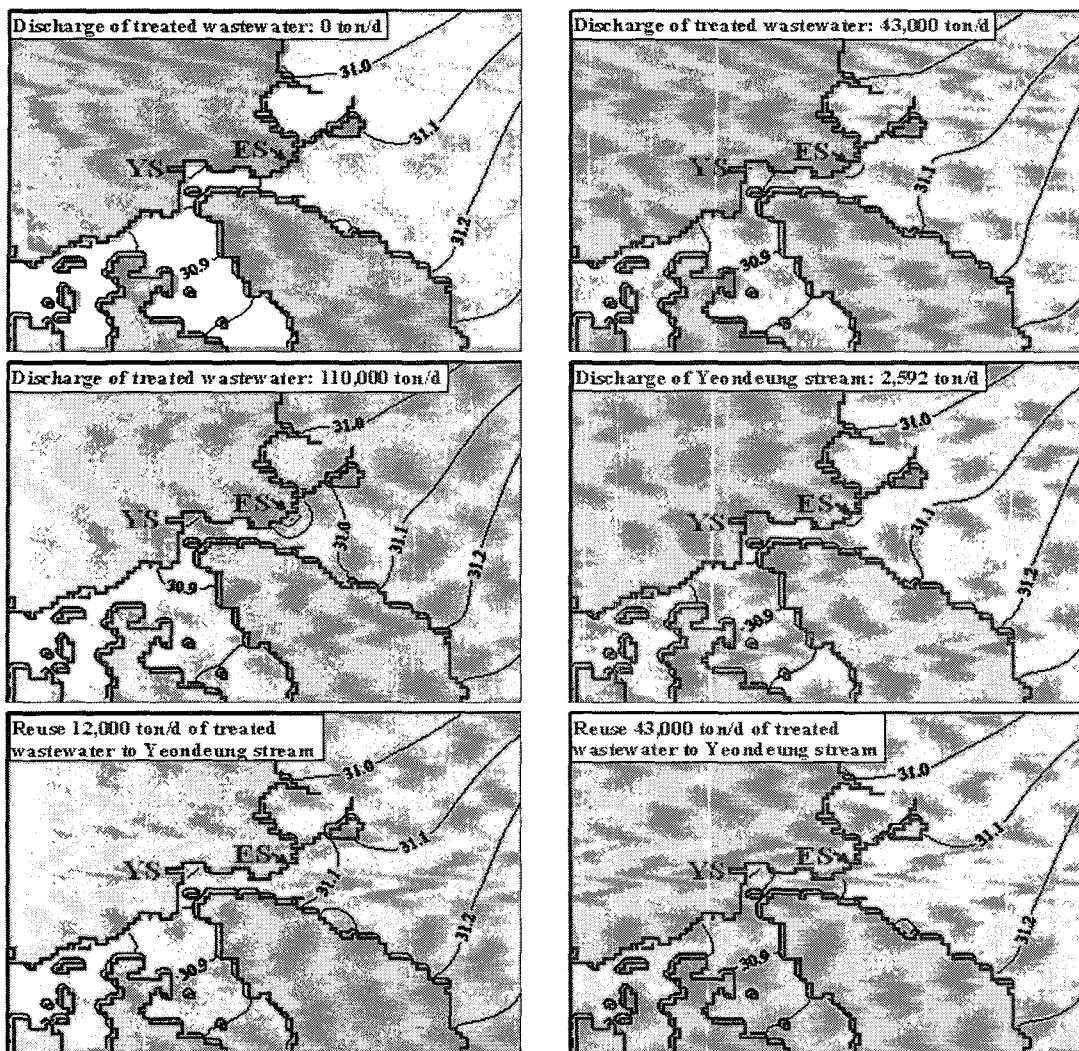


Fig. 8. Surface salinity distribution of the study area by variation of treated wastewater discharge.

mg/L 이상의 상대적 고농도를 나타내었다. 이러한 값으로 볼 때, 이 지역은 하계에 기본적으로 높은 베이스 농도 (해역자체가 갖고 있는 농도)를 가지고 있는 것으로 사료되었다. DIN은 하수방류구 전면 해역에서 약 $2.0 \mu\text{M}$ (약 0.03 ppm) 범위로 여수해만의 내측 (광양만 방향)으로 갈수록 다소 증가하는 양상을 나타내었다. 또한, 연동천 하류해역에서 $3.0 \mu\text{M}$ 이상의 값을 보여주는 등 가막만에서 $3.0\text{--}5.0 \mu\text{M}$ 범위의 고농도를 나타내었다. DIP는 여수항 인근에서 약 $0.3 \mu\text{M}$ 전후로 나타났고, 최종 방류역 전면 해역에서는 약 $0.2 \mu\text{M}$ (약 0.006 ppm) 정도를 나타내었다. 이러한 상황에서, 현재 일평균 하수처리량 약 $43,000 \text{ m}^3/\text{d}$ 이 유입되면 하수유입이 없을 경우와 비교해서 하수방류구 전면 해역에서 COD 농도는 매우 크게 증가하고 확산

정도도 미미한 것으로 예측되었다. 이에 반해서, DIN과 DIP의 증가폭과 확산범위는 COD와 비교해서 상대적으로 큰 것으로 나타났는데, DIN은 하수방류구 전면 해역에서 $4.0 \mu\text{M}$ 이상, DIP는 $0.35 \mu\text{M}$ 이상으로 증가하였다. 또한, 하수방류구를 중심으로 강한 영양염 수평농도전선이 형성되는 것으로 예측되었고, 그 폭은 DIN은 약 1 km 내, DIP는 약 500 m 내로 평가되었다. 하수처리수 방류량이 약 $110,000 \text{ m}^3/\text{d}$ 경우에는 COD의 변화는 상기의 $43,000 \text{ m}^3/\text{d}$ 유입시와 유사하였지만 (전면 해역에 최대 약 0.2 ppm 상승), DIN 농도는 매우 큰 폭으로 증가하였고, 확산범위도 컸다. 즉, 하수방류구 전면 해역에서의 농도는 약 $7.5 \mu\text{M}$ 이상으로 예측되었고, 그 영향은 가막만쪽으로는 대경도 북쪽 해역, 여수해만 방향으로는 외측 약 2 km 정도까지

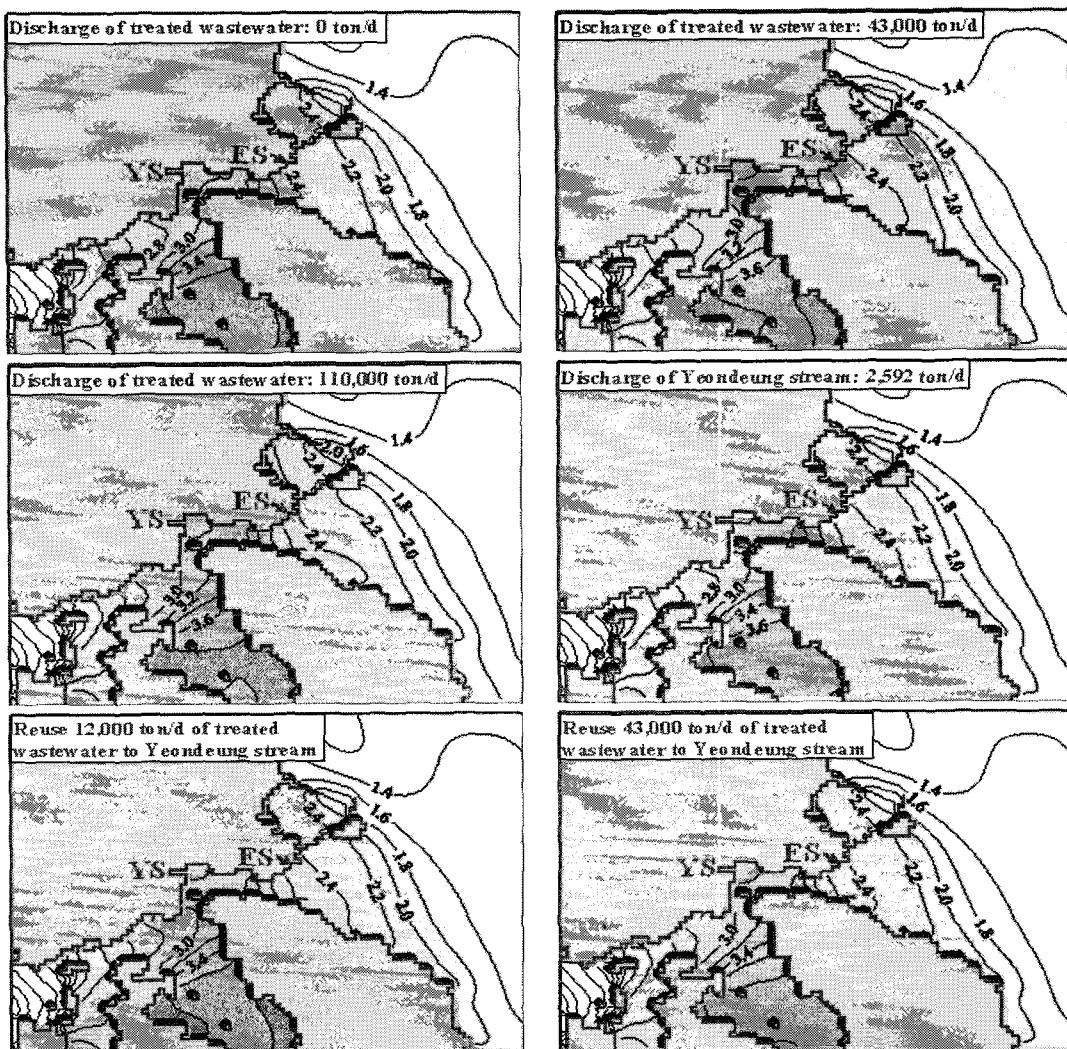


Fig. 9. Surface COD distribution (mg/L) of the study area by variation of treated wastewater discharge.

확장하는 것으로 나타났다. DIP는 하수방류구 전면 해역에서 약 $0.4 \mu\text{M}$ 이상으로, 그 확산폭은 DIN보다는 다소 제한적이었다.

이러한 상황에서 건천시기에 연동천으로 하수처리수 $12,000 \text{ m}^3/\text{d}$ 를 유입 방류시켰을 때, 여수항 인근해역에서 COD 약 0.05 mg/L 상승 (약 1% 증가), DIN은 약 $1.4 \mu\text{M}$ (약 29%), DIP는 약 $0.1 \mu\text{M}$ (약 29%) 상승하며, 질소와 인의 상승이 큰 것으로 시뮬레이션되었다. 연동천으로 유입하는 하수처리수 증감에 따라 오염도와 확산범위가 증감하는데, 하수처리수 전량 즉, 약 $43,000 \text{ m}^3/\text{d}$ 를 유입했을 경우, 여수항 인근해역에서 COD 약 0.1 mg/L (약 3%) 상승, DIN은 약 $5.19 \mu\text{M}$ (약 110%) 상승, DIP는 약 $0.35 \mu\text{M}$ (약 110%) 상승하는 것으로 시뮬레이션되었다.

이와 같이, 현재의 실제 방류량과 처리수질조건을 고려하여 하수처리수를 최종방류구를 통해 해역으로 유입시켰을 경우에는 해수의 수질이 다소 변하지만, 오염물질 농도의 급증, 수질오염의 확산 등 해양환경에 미치는 악 영향은 매우 미미한 것으로 나타났다. 다만, COD의 변동보다는 질소와 인 등 영양염류의 증가가 더 큰 것으로 예측되어 질소와 인 등 영양염류 농도를 지속적으로 감소시켜야 하는 것으로 판단되었다.

3.5. 수질화산의 공간적 비교 평가

하수 무방류시와 하수처리 시설용량인 $110,000 \text{ m}^3/\text{d}$ 유입시의 비교정점에 있어서 염분 및 수질변화 정도를 비교한 결과를 Fig. 12에 제시하였다. 염분은 정점 A에서 약 1.0 psu 의 변동을 나타내었으나, 다른 곳에서는 모두 그 이하의 변동이 예측되

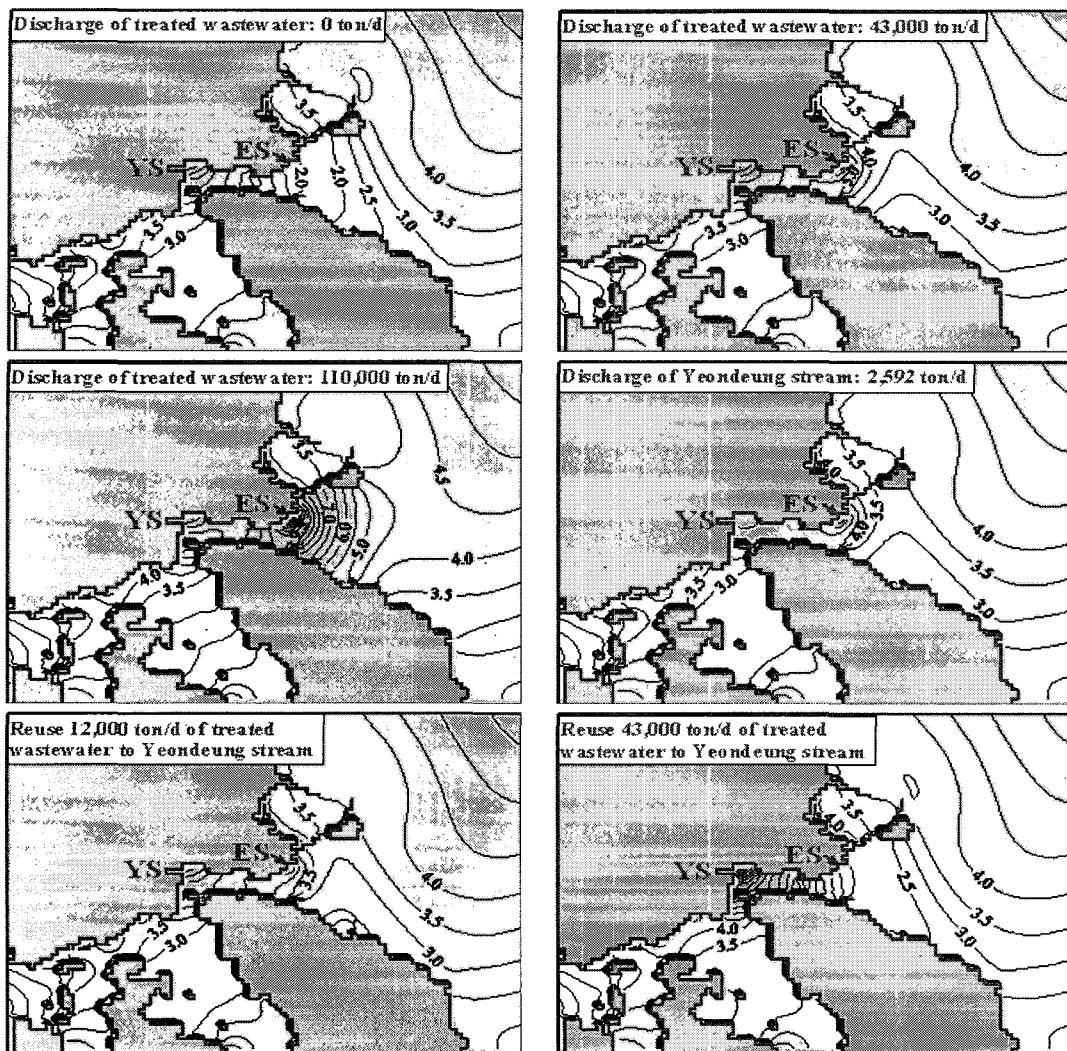
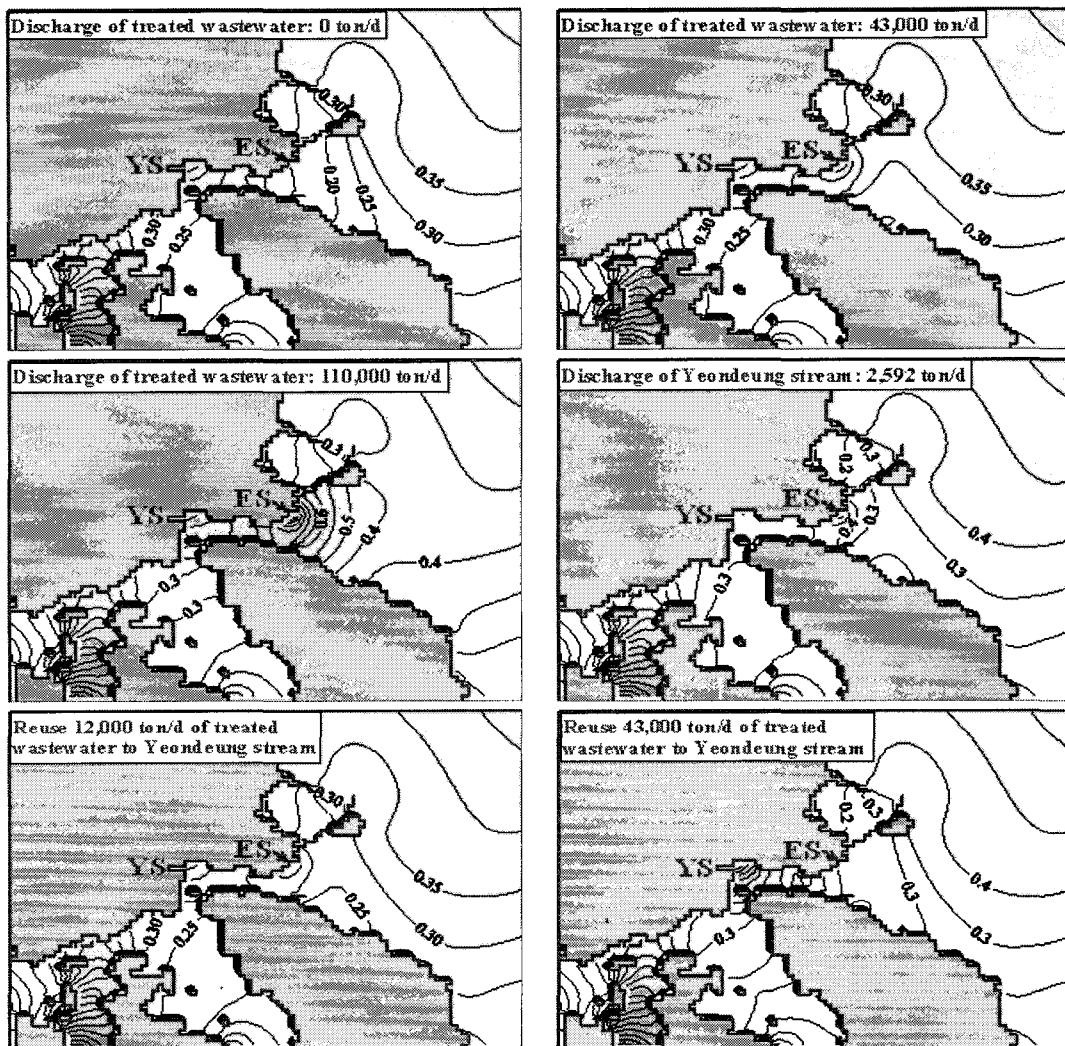


Fig. 10. Surface DIN distribution (μM) of the study area by variation of treated wastewater discharge.

었다. 특히, 방류구 전면 해역 및 돌산도 동부 해역에서는 0.5 psu 이하의 변화도를 나타내어서 하수처리수 유입에 따른 염분의 급격한 변화와 저염의 영향은 거의 없는 것으로 평가되었다. COD의 변화도는 정점 A를 포함한 거의 모든 곳에서 약 0.2 mg/L 정도 이하의 변동을 나타내어서 연구해역의 하계 베이스 농도와 하수처리수의 실제 방류량 조건 등을 고려하면 해역 COD의 변화와 확산의 영향은 미미한 것으로 계산되었다. 해역의 DIN과 DIP 농도는 하수처리수 유입에 따라서 COD 보다 큰 변동특성을 보였다. 하수처리수가 직접적으로 유입되는 방류구에서 가장 가까운 정점인 A는 DIN 약 0.25 mg/L 이상, DIP 약 0.04 mg/L 정도의 변동을 나타내어 수질응답성이 매우 민감하였다. 또한, 방류구 인근지점인 B, C, F, G, H 정점에

서는 DIN 약 0.05 mg/L 이상, DIP 약 0.007 mg/L 이상의 변동이 시뮬레이션되었다. 방류구에서 가장 멀리 떨어진 E에서는 DIN과 DIP가 각각 0.01 mg/L과 0.001 mg/L 정도의 변화, 그리고 K 정점에서는 0.02 mg/L와 0.002 mg/L 정도의 변화가 예측되었다. 그리고 각 정점에서의 염분 및 수질변화를 검토한 결과, 하수처리수 방류의 영향은 B 정점을 기준으로 동서방향으로 유사한 변화도와 확산경향을 나타내지만, 남동방향으로 확산이 더 강하게 나타나는 것으로 판단되었다. 그러나 실제 방류량을 고려한다면 정량적으로는 오염물질의 확산정도와 범위는 매우 미미하고 제한적인 것으로 사료되었다. 참고적으로 시뮬레이션된 DIN과 DIP 농도에 연구해역에서 실측한 DIN과 TN 비율과 DIP와 TP 비율을 각각 곱해서 TN과 TP를 평가한 결과,

Fig. 11. Surface DIP distribution (μM) of the study area by variation of treated wastewater discharge.

TN 약 0.1 ppm 상승역이 가막만 내측 정점인 E까지 (약 3 km 내), 여수해만은 방류구에서 남동 방향으로 최대 약 2.5 km까지인 것으로 추정되었다. TP는 약 0.01 ppm 상승역이 가막만 방향으로 약 2 km까지, 그리고 여수해만도 약 2 km까지인 것으로 추정되었다. 이 같은 결과는 위에서 언급한 전 환계수를 곱해서 환산한 결과로 간접평가라는 것을 고려해야 할 것이다.

또한, 본 연구에서는 모델영역의 각 격자점에서 생태계모델의 구성요소의 현존량에 기여하는 이류와 화산작용에 의한 물리과정량을 산정하여 연구 해역의 어떤 공간에서 물질의 축적현상이 일어나는지를 파악하였다. Fig. 13과 같이 식물플랑크톤 현존량의 간접적인 지표인 Chl-a에 기여하는 물리 과정이 집적이 강하면 흑색부분으로 표시하였는데,

돌산도 우두리 전면 해역, 돌산대교 주변을 포함한 가막만 북쪽 수로 주변과 대경도 서쪽 일부에서 물질의 집적이 강하게 일어나는 곳으로 평가되었다. 빛금친 부분으로 표시한 발산지역은 여수해만 및 가막만 내부에서 지배적으로 나타났고, 블랭크(흰색) 부분은 집적과 발산이 평형을 이루는 곳으로 돌산도 동쪽 연안에서 강하게 형성되는 것으로 예측되었다. 방류구 앞 지점은 발산이 이루어지지만, 그 전면 해역은 대체로 발산과 집적이 평형을 이루는 것으로 나타나서 장기간의 조류운동의 변동이 크지 않다면, 바람과 방류량의 세기에 따라 물질의 운송이 달라질 수 있을 것이라 판단되었다.

3.6. 연동천의 허용오염부하량 산정

대상해역에서 수질이 가장 악화되기 쉬운 연동천 하구해역을 기준으로 COD, TN과 TP에 대해

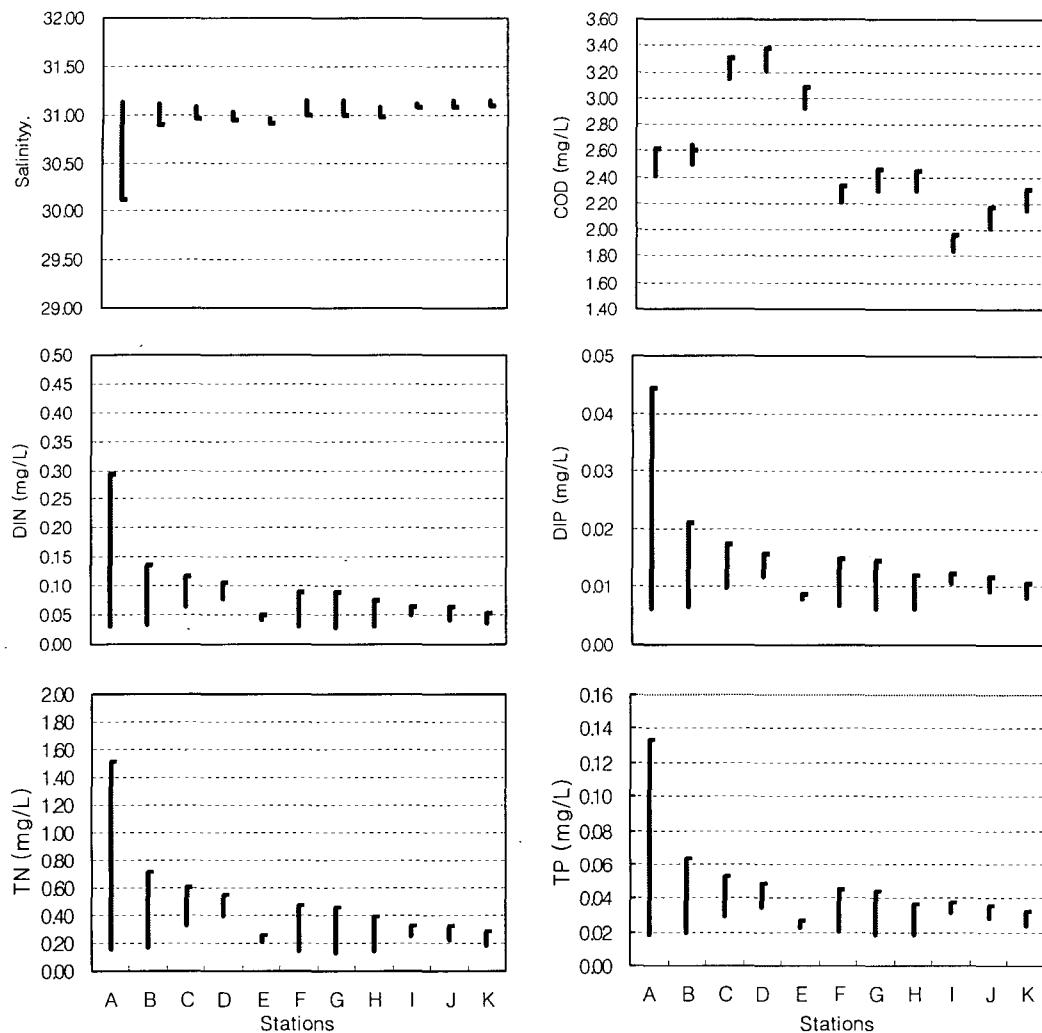


Fig. 12. Water quality variations of each stations between no discharge and 110,000 m³/d of treated wastewater.

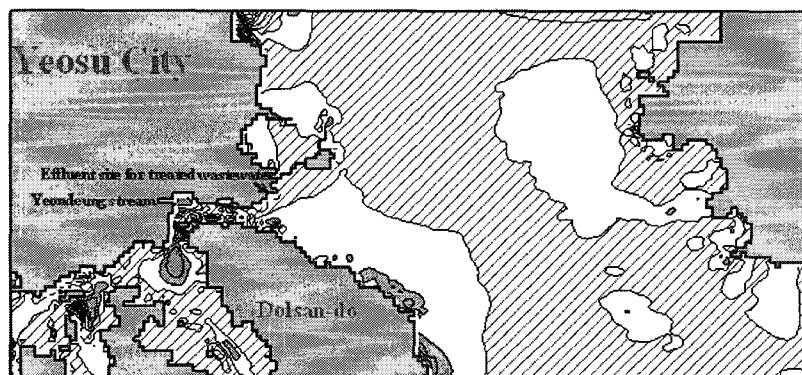


Fig. 13. Distribution of contributed physical process to Chl-a at surface level in the model area: filled area, accumulation; slanted area, transportation; blanked area, balance accumulation with transportation.

해역수질환경기준 III등급 동시만족을 목표로 해서 연등천의 허용오염부하량 (수질적인 측면의 환경

용량)을 산정하면 Table 4와 같다.
우선, 해역으로 유입하는 오염원 또는 유입원에

Table 4. The estimation of total allowable pollutant loads in estuary of Yeondeung stream

Water quality factor	COD (ton/day)	DIN (kg/day)	TN (kg/day)	DIP (kg/day)	TP (kg/day)	Remarks
Total allowable pollutant loads	0.1128	48.4848	69.2640	11.9280	17.0400	DIN/TN=DIP/TP: about 0.7

대해서는 과거에는 단순히 오염물질의 농도규제만을 고려했지만, 최근에는 해역의 효과적인 수질관리와 오염대책을 위해서는 해양으로 유입하는 유입원 (Sources)의 오염물질의 농도 뿐만 아니라 수량 (水量)까지 동시에 고려하는 총량관리가 필수적이다. 즉, 유입원에서 배출되는 오염물질의 농도는 환경기준을 만족해도 배출 수량이 많으면 그 만큼 해역이 받는 오염물질의 총량이 증가해 수질에 악영향을 미칠 수 있는 것이다. 이러한 관점에서, 연동천 하류해역에 설정된 해역수질환경기준을 만족하면서 연동천이 배출할 수 있는 최대오염부하량 (허용오염부하량)은 COD, TN과 TP가 각각 약 0.1128 ton/d, 69.2640 kg/d와 17.04 kg/d 이하로 산정되었다. 하수처리수 12,000 m³/d를 방류할 경우, 처리수의 COD는 9.4 ppm이하가 되면 하류 해역에 큰 영향은 없는 것으로 나타났고, 이러한 농도는 현재 하수처리수가 만족하는 것으로 나타났다. 만약 하수처리수 20,000 m³/d를 방류할 경우는 COD를 약 5.6 ppm이하로 유지해야 하는 것으로 예측되었다. TP를 살펴보면, 하수처리수 12,000 m³/d를 방류할 경우에는 약 1.4 ppm이하가 되어도 하류 해역에 큰 영향은 없는 것으로 나타났고, 이러한 농도는 COD와 마찬가지로 현재 하수처리수가 만족하는 것으로 나타났다. 만약 하수처리수 20,000 m³/d를 방류할 경우는 TP를 약 0.85 ppm이하로 유지해야 하는 것으로 예측되었다. TN의 경우에는, 하수처리수 12,000 m³/d를 방류할 경우에는 약 5.77 ppm이하를 상시 만족해야하는데, 현재 하수처리수의 시뮬레이션 기본 값 (9.62 ppm)이 이러한 농도 값을 초과하는 것으로 나타나서 약 40% 이상을 저감하면 하류 해역에 큰 영향은 없는 것으로 나타났다. 만약 하수처리수 20,000 m³/d를 방류할 경우는 TN을 약 3.46 ppm이하로 유지해야 하는 것으로 예측되었다.

한편으로, 현재 하수처리수의 COD는 최대 9.4 ppm, 이 때의 BOD는 약 5.9 ppm으로 12,000 m³/d를 연동천으로 방류할 경우 해역에 미치는 영향은 미미하지만, 하수처리수 재이용에 있어서 친수용수 권고기준인 3.0 ppm이하보다 높은 값을 보이고 있고, 다른 지역의 사례에 비해서도 높은 값 (대구 신천의 유지용수로 이용되는 신천하수처리수의

BOD는 2004년 2.4 mg/L로 관리)이라서 좀 더 양호한 하천 및 해역수질관리를 위해서 농도의 지속적 저감이 필요하다고 사료된다. 하수처리수의 총인도 현재 최대 약 1.4 ppm으로 12,000 m³/d를 연동천으로 방류할 경우 해역에 미치는 영향은 미미하지만, 하수처리수 재이용에 있어서 친수용수 권고기준인 1.0 ppm이하보다 다소 높은 값을 보이고 있어서 앞서 언급한 COD (또는 BOD)와 같이 농도가 지속적으로 감소되면 매우 효과적인 수질관리가 될 것으로 판단된다. 현재 하수처리수의 TN 농도는 친수용수 권고기준인 10.0 ppm이하를 만족하지만, 위에서 언급했듯이 12,000 m³/d를 연동천으로 방류할 경우 해역에 미치는 영향이 크므로 농도저감이 이루어져야 할 것이다. 종합적으로 정리하면, 하수처리수 12,000 m³/d를 연동천으로 방류시키고자 경우, 하수처리수 재이용에 따른 친수용수 권고기준과 해역의 수질환경기준을 만족하기 위해서는 BOD는 현재의 최대 5.9 ppm이하에서 3.0 ppm이하로, TN은 현재의 최대 9.62 ppm에서 5.77 ppm이하로, TP는 현재의 최대 1.42 ppm에서 1.0 ppm이하로 유지하는 것이 타당할 것이다.

3.7. 연동천 환경복원과 해역수질관리방안에 대한 제언

이와 같은 해역의 환경용량 만족과 효과적인 수질관리를 위해서는 다음을 고려해야 할 것이다. 첫째, 연동천의 생태복원과 수질회복을 위해서 기본적으로 풍부한 유지수량이 필요하지만, 이를 위해 하수처리수를 이용하고자 할 때 해양환경영향을 최소화하기 위해 반드시 유입시키는 오염물질의 농도와 방류량 조건을 허용오염부하량 조건 이하로 고려해야 할 것이다. 하수 12,000 m³/d를 기준으로 현재의 오염물질농도를 좀 더 정화과정을 거쳐 저감후 연동천으로 유입시키는 것이 최적 수질관리방안이고, 차후 점진적으로 Table 4의 허용오염부하량 (수량 × 오염물질 농도)을 고려하면서 수량을 증가하는 방법이 타당할 것으로 판단된다. 참고로, 다른 지역의 하천 유지용수로 계획하고 있는 하수처리수량이 대부분 3만톤 이상이고, 이 정도의 수량에 오염물질농도만 잘 관리하면 현재 상태에 비교해서 연동천으로 인한 저염분 확산과 수질악화는 없는 것으로 판단되었다. 둘째, 하수처리수의

좀 더 향상된 오염물질 저감과 동시에, 하수관거로 이송되지 않고 연동천으로 직·간접적으로 유입되는 미처리된 오염물질의 량이 매우 많은 것으로 관측되었다. 특히, 최하류역에서는 다양한 생활활동, 선박정박 및 어폐류 판매활동으로 인한 오염물질의 유입과 더불어 수질이 매우 악화된 상태이다. 연동천의 생태복원과 친수공간 조성을 위해서라도 반드시 이러한 부분은 정비해야 할 것으로 판단된다. 즉, 하수처리수를 이용한 연동천의 수질과 해역에 미치는 영향을 최소화하기 위해서는 연동천 및 인근 해역으로 유입하는 다른 접원/비접오염원의 차단과 관리가 필수적이라 사료된다. 세째, 중장기적인 관점에서 이 해역이 갖고 있는 오염물질의 베이스 농도 저감을 위한 지속적인 관리와 퇴적물 정화 등의 대책도 필요하다.

하수처리수 재이용의 대표적인 성공사례로, 대구시는 전천화된 신천을 살리기 위해 하수처리수 등 약 12.5만톤/일을 유지용수로 이용하였고, 이러한 유지용수의 꾸준한 수질개선에 의해서 신천의 수질도 뚜렷이 개선되고 있는데, 2000년 3급수에 해당하는 BOD 4.1 mg/L에서 2002년에는 2.6 mg/L로 2급수 수질을 회복했을 뿐만 아니라, 2004년의 경우에는 1.9 mg/L로 1급수에 가까운 수질을 보여주었다.

한편, 연동천의 식생조사결과, 연동천 상류지역의 식물은 고수부지 내 논냉이, 쇠뜨기, 고마리 및 벼과식물이 주종을 이루고, 하류부분은 초본류 몇 종 이외에는 분포하지 않고, 제방사면은 석축으로 되어 있어 식생이 대단히 빈약하며 군데군데 갈대나 벼과 식물이 분포하고 있는 것으로 나타났다. 하상정비나 기타 쓰레기 등의 유입으로 번식한 총 17종의 귀화식물이 분포하고, 수생 및 습생식물은 달뿌리풀 등 24과 64종이 존재하는 것으로 나타났다. 어류는 봉어 단 1개체만이 확인되었고, 담수조류로 *Melosira italica*, *Cymbella fumida*, *Euglena elegans*, *Melosira Varians*, *fragilaria constuens* 등이 분포하였다¹¹⁾. 또한, 연동천은 좌우안 공히 석축 칠쌓기로 시공되어 자연적인 하천의 모습은 볼 수 없고, 저수호안은 최하류지역을 제외하고 돌망태호 안공법으로 조성되었으나 상당부분 유실한 상태이다. 갈수기에는 유량이 급격히 감소하고, 홍수기에는 유출량의 증가로 홍수가 초래되는 유역특성을 갖고 있으나, 지속적인 치수사업으로 홍수예방은 어느 정도 균형이 잡혀 있으나, 도시하천으로서의 생태기능과 친수기능은 미흡한 실정이다. 이러한 상황에서 연동천의 수량확보와 생태복원 등의 목적으로 하수처리수를 재이용해서 상류유역에 유입시키면 유지유량 등 수량은 확보할지 몰라도 수질

오염 측면에서는 현재 방류되는 수질보다 좀 더 오염물질을 저감해야 할 것이다. 즉, 처리장에서의 수질오염물질 저감노력과 동시에 연동천 상류에 방류한 처리수가 해역으로 도달하기 전에 오염물질의 자연적인 농도감소가 일어날 수 있도록 친환경적 식생, 저류조에서의 오염물질 희석과 감소 등을 포함한 다양한 방법을 고려하는 것이 효과적일 것이다. 물론, 연동천 하류 해역은 오염원으로 연동천 뿐만 아니라 주변에 산재한 접오염원 및 비접오염원이 산재해 있고, 미처리된 오염물질이 직간접으로 유입해서 수질이 매우 악화된 상태이므로 하수처리수의 재이용에 따른 생태복원 및 친수공간 조성이라는 목적과 결과가 훼손 안 되게 하기 위해서 이를 근본적으로 그리고 지속적으로 차단/관리하는 대책이 반드시 강구되어져야 한다.

4. 결 론

생태계 모델을 이용해서 하수처리수를 인근 해역으로 방류했을 경우와 도시하천의 기능회복을 위해 재이용/유입시켰을 경우에 따른 영향을 시뮬레이션한 결과, 하수처리수를 현재의 일평균 방류량과 오염물질 농도조건으로 최종방류구를 통해서 인근해역으로 유입시켰을 때, 저염수로 인한 수질에 미치는 영향은 거의 없고, 시설용량인 110,000 ton/d를 방류시켜도 방류구 주변에 다소의 저염분 확산이 일어나지만, 그 폭은 매우 작아서 그 영향은 매우 미미한 것으로 예측되었다. 또한, COD의 증가로 인한 확산 영향은 미미했지만, TN과 TP 특히, 질소의 증가가 상대적으로 더 큰 것으로 예측되어 향후 방류량 증가시 이에 관한 대책이 필요한 것으로 나타났다. 현재의 조건(방류량과 방류수질)에서 하수처리수 유입에 따른 해역수질오염의 가중과 확산에 의한 악 영향이 미미하더라도, 장래의 설계상 변화에 따른 해양환경에 미치는 영향의 최소화와 그리고 연동천으로 하수처리수를 재이용하고자 할 때, 친수용수 권고수질기준과 하구해역의 환경용량을 만족하기 위해서는 하수처리수의 오염물질농도, 질소와 인을 허용오염부하량 기준으로 좀 더 저감하는 것이 최적 수질관리방안으로 사료된다. 또한, 연동천 및 해역으로 직·간접적으로 접원/비접오염원에서 유입되는 미처리된 오염물질의 부하량이 커서 이에 대한 차단과 관리가 필수적이라 사료되고, 중장기적인 관점에서 연구해역이 갖고 있는 오염물질의 베이스 농도 저감을 위한 지속적인 모니터링과 퇴적물 정화 등을 포함하는 해역 수질관리대책이 시행되면 좀 더 향상된 해양환경이 조성될 것으로 판단되었다.

감사의 글

이 논문은 2005년 여수시 지원에 의해 수행되었습니다. 자료협조와 현장조사에 도움을 주신 전남대학교 해양기술학부 해양시스템 보전 및 공학 전공 교수님들과 학생들에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) 박재로, 임현만, 2004, 생활하수의 하천유지용수 재이용을 위한 하천직접처리공법 적용방안, 한국물환경학회·대한상하수도학회 공동춘계학술 발표회 논문집, 733-736.
- 2) 서울시정개발연구원, 1999, 하수처리수 재이용 타당성 연구, 157pp.
- 3) 환경관리공단, 2001, 하수처리수 재이용 기술에 관한 연구.
- 4) 해양수산부, 2001, 환경관리해역 시범해역관리 시행계획 수립연구-가막만 환경보전해역 현황-, 275pp.
- 5) 한국해양수산개발원, 2005, 여수시 연안관리 지역계획 최종안.
- 6) 이연규, 김종규, 이규형, 조현서, 윤양호, 한경호, 신현출, 최상덕, 이문옥, 2006, 가막만/자연환경과 산업, 구역인쇄출판사, 247pp.
- 7) 이대인, 조현서, 2002, 가막만 유역의 오염부하 특성에 관한 연구, 한국환경과학회지, 11(9), 945-954.
- 8) 여수시, 2005, 연동천 하천정비 기본계획 사전 환경영성검토서, 206pp.
- 9) 여수시, 2004, 연동천 자연형(오염)하천 정화사업 실시설계 보고서, 187pp.
- 10) 황병기, 호종광, 오경석, 2005, 홍제천 정비를 위한 하천유지유량 확보 및 수질개선 방안 연구, 환경영향평가, 14(1), 37-46.
- 11) 이공범, 김용구, 박성천, 2004, 광주천의 하천유지유량의 유입수질농도 결정에 관한 연구, 수처리기술, 12(1), 67-74.
- 12) 해양수산부, 2005, 해양환경공정시험방법, 400pp.
- 13) Chihara M., Murano M., 1997, An Illustrated Guide to Marine Plankton in Japan, Tokai University Press, Tokyo, 31-483. (in Japanese).
- 14) Tomas C. R., 1997, Identifying marine diatoms and dinoflagellates, Academic Press, Oxford, 858pp.
- 15) 환경부, 2000, 수질오염공정시험방법.
- 16) Kremer J. N., Nixon S. W., 1978, A coastal marine ecosystem. In: Simulation and Analysis, Ecological Studies, 24, Springer-Verlag, Berlin, 217pp.
- 17) Nakata K., Kishi M., Taguchi, K., 1983, Eutrophication model in coastal bay estuary, Dev. Ecol. Environ. Quality, 2, 357-366.
- 18) Lee D. I., Kim J. K., 2007, Estimation of total allowable pollutant loads using eco-hydrodynamic modeling for water quality management on the southern coast of Korea, J. Korean Soc. Marine Environ. Eng., 10, 29-43.
- 19) 한국해양연구소, 1996, 한반도 주변 조석 조화 상수 자료집, 282pp.
- 20) 여수시, 2001, 여수시 진두-하동간 군도사업지구 환경성 검토 및 어업 피해영향조사, 331pp.
- 21) 여수시, 1995, 여수·여천시 통합하수종말처리장 설치와 관련처리수의 해역배출에 따른 시뮬레이션 연구 및 개선방안, 366pp.
- 22) Bowie G. L., Pagenkopf J. R., Rupp G. L., Johnson K. M., Chan W. H., Gherini S. A., Mills B., Porcella D. B., Campbell C. L., 1985, Rates, Constants, and Kinetics Formulations in Surface Water Quality Modeling, 2nd ed., EPA/600/3-85/040, USEPA, Athens, GA.
- 23) Jorgensen S. E., 1979, Handbook of Environmental Data and Ecological Parameters, International Society for Ecological Modeling.