

## 폐수처리장의 전 방류수 독성 평가 및 방류수 배출하천의 생지표도 영향분석

나진성 · 김상돈<sup>†</sup> · 안광국\* · 장남익\*\*

광주과학기술원 환경공학과 · \*충남대학교 생명과학부 · \*\*영산강 불환경연구소

(2004년 10월 21일 접수, 2005년 3월 18일 채택)

### The Whole Effluent Toxicity Tests of Wastewater Discharged from Various Wastewater Treatment Plants and Their Impact Analyses on Biological Component

Jin Sung Ra · Sang Don Kim<sup>†</sup> · Kwang Guk An\* · Nam Ik Chang\*\*

Department of Environmental Science and Engineering, Gwangju Institute of Science and Technology

\*School of Bioscience & Biotechnology, Chungnam National University · \*\*Yongsan-river Environmental Research Laboratory

**ABSTRACT :** In this study, we performed whole effluent toxicity(WET) test and compared the biological component analyses tests for some streams into which wastewater treatment plant effluents are discharged. The test procedures for the WET test and the biological component analysis were conducted according to U.S. EPA guidelines and the Ohio EPA wading method. The WET tests based on the test species of *D. magna* and *S. capricornutum*. All treatment plants showed a *S. capricornutum* toxicity, and at 7 sites, except A and J, we could observe a *D. magna* toxicity. The highest toxicity was observed at site D and this were followed by E and F. The biological component analyses applied to the effluent discharged stream. We found that total species were low at sites C1, D1 and J1 and the low number of total individuals were observed at sites A1, C1, E1, H1, and J1 compared to the controls and other sites. The species richness was low at sites A1, B1, C1, D1, and J1. The species change was evident at site D(D1) and the tolerant species was predominant. The biological analyses and WET tests suggested that the effluents resulted in massive ecosystem impact.

**Key Words :** Whole Effluent Toxicity Test(WET), Bio-index, *Selenatrum Capricornutum*, *Daphnia Magna*

**요약 :** 전남지역에 존재하는 9개 하수종말처리장(A, B, C, D, E, F, H, I, J)의 방류수가 배출되는 하천에 대한 방류수의 영향을 알아보기 위해 하천에 대한 생 지표도 평가 및 전 방류수 독성 평가(Whole effluent toxicity test)를 실시하였다. WET 평가와 생지표도 평가는 U.S. EPA 시험 방법과 Ohio EPA wading method에 근거하여 수행하였다. 전 방류수 독성 평가를 위해 표준 시험 종인 *S. capricornutum*과 *D. magna*를 사용하였다. 전 방류수 독성 평가결과 모든 지점에서 *S. capricornutum* 독성이 나타났으며, *D. magna* 독성 평가 결과에서는 A지점과 J지점을 제외한 모든 지점에서 독성 효과를 보였다. 표준 시험 종의 독성 평가 결과에 따르면 D지점에서 가장 높은 독성을 나타내었고, E지점과 F지점에서도 높은 독성 결과를 나타내었다. 이들 지역에 대한 생지표도 분석 결과 C1과 D1, J1 지점에서 낮은 종의 수 분포를 나타내었으며, A1, C1, E1, H1, J1 지점에서는 대조군 지역이나 타 지역보다 낮은 개체수를 나타내어 방류수로부터 악영향을 받고 있는 것으로 판단되었다. A1, B1, C1, D1, J1지점에서는 낮은 종의 풍부도를 보였으며, 전 방류수 독성 평가 결과에서 가장 높은 독성을 나타내었던 D지점(D1)에서는 오염에 내성이 강한 종이 매우 우점 하는 것으로 나타났다. 전 방류수 독성 평가 및 생물지수 분석결과에 따르면 모든 하천지역에서 방류수에 의한 영향이 나타나고 있는 것을 알 수 있었으며, *D. magna*와 *S. capricornutum*의 독성이 같이 나타나는 지점에서는 생 지표도 분석 결과에서도 동일하게 생태계에 영향을 주는 것으로 나타났으며, *S. capricornutum*만의 독성이 나타나는 지점에서도 생태계의 변화가 나타나고 있었다.

**주제어 :** 전 방류수독성평가, 생 지표도, *Selenatrum capricornutum*, *Daphnia magna*

## 1. 서론

현재 운영되고 있는 국내 하수종말처리장은 2003년 말 기준으로 243개에 이르고 있으며,<sup>1)</sup> 현재에도 많은 하수처리장이 건설되고 있으나, 이에 대한 하천 생태계의 영향 및 방류수에 대한 독성평가에 대한 다각적인 검토가 시급한 실정에 있다. 하수처리장의 목적은 오수를 공공 수역으

로 배출하기 전에 보건 위생상으로 적합하고 모든 국민이 건강하고 쾌적한 환경에서 생활 할 수 있도록 하기위해 운영되고 있다.<sup>2)</sup> 정부에서도 이러한 목적을 달성하기 위하여 하수처리장 방류수에 대한 방류수 배출 허용기준을 법제화하여 시행하고 있다. 그러나 현재 국내 하수처리장에 대한 방류수 배출 허용기준은 생활하수와 농공단지 오·폐수 처리장에 대해서는 생물학적 산소요구량(BOD), 화학적 산소요구량(COD), 부유물 농도(SS), 총 질소(TN), 총 인(TP)과 대장균군수 등 총 6개 항목에 대하여 규제를 실시하고 있다. 또한 산업단지 폐수종말처리시설의 경우에는 폐놀류 등

<sup>†</sup> Corresponding author  
E-mail: sdkim@gist.ac.kr  
Tel: 062-970-2455

Fax: 062-970-2434

25종의 오염물질에 대하여 규제를 실시하고 있다. 따라서 이러한 기본적인 유기물 부하량(생활하수 및 농공단지 오·폐수 처리장)만으로는 현재 배출되고 있는 방류수가 인근 수계에 영향을 주지 않는 상태로 배출되고 있다고 단정 지을 수 없다. 선진국 등에서는 이런 수계영향을 평가하기 위해 방류수 배출시설에 생물학적 모니터링 기법을 도입하여 방류수의 독성을 모니터링 하고 있다. 이러한 생물학적 모니터링 방법은 단순한 유기물 부하량이나 몇몇 화학물질 등에 대한 화학적인 분석을 통해서 탐지할 수 없는 방류수의 독성을 스크리닝 할 수 있는 장점이 있다. 많은 문헌에서도 전 방류수 독성평가는 어느 정도의 논쟁의 여지는 있으나 일반적으로 하수처리장 방류수 중에 존재하는 유기인계 농약류나 세제류, 폴리머류 등의 존재 확인에 유용하게 사용될 수 있는 방법으로 사용될 수 있다고 인정하고 있다.<sup>3,4)</sup> 생물학적 전 방류수독성평가에 널리 사용되는 표준 생물 시험 종으로는 *Daphnia magna*, *Japanease medaka*, *Selenastrum capricornutum*, *Ceriodaphnia dubia*, *Rainbow trout* 등 다양한 종들이 사용되고 있다. 그러나 현재 국내의 방류수 배출시설은 이와 같은 생물학적 독성 모니터링 방법을 사용하여 운영되고 있는 처리장이 전무한 실정이다. 따라서 이들 처리장들이 인접한 하천의 건강 상태가 처리장에서 배출되는 다양한 오염물질 등에 의해 영향을 받고 있을 수도 있는 상황에 있다. 현재 선진국 등에서도 하수처리장등에 대한 전 방류수 독성 평가 연구에 대한 많은 연구가 진행 중에 있다. 국내에서도 혼합된 상태로 존재하는 오염물질의 혼합독성 영향에 대한 연구와 통합 방류수 독성 평가에 관한 연구가 몇몇 연구자들에 의해 수행된 바 있다.<sup>5,6)</sup> 그러나 이러한 결과를 실제 하천의 생태계의 건강 상태와 연관시켜 처리장에 대한 방류수의 독성 정도를 평가한 연구는 미비한 실정에 있다.

본 연구에서는 현재 전라남도 지역에 산재한 9개 하수종말처리장에 대한 전 방류수 독성 평가(WET)를 통해 이들 처리장이 생물학적으로 적절하게 운영되고 있는지를 판단하였다. 또한 이들 처리장에 인접한 하천의 생 지표도 평가를 실시하였고, WET 시험 결과가 하천의 건강상태와 비교하여 상관된 결과를 나타내는데에 대한 분석을 수행하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1. 시료채취

본 연구에서 하수처리장 및 농공단지 방류수 채취는 영산강(길이 ; 115 km, 면적 ; 2.8×103 km<sup>2</sup>, 부피 ; 52 m<sup>3</sup>/sec) 유역에 존재하는 9개 배출시설을 대상으로 하였다. 방류수 시료 채취는 계절적인 영향을 알아보기 위해 봄, 여름, 가을, 겨울로 나누어 실시하였다. 실험에 사용된 시료는 각 방류수 처리시설 및 농공단지 폐수 처리시설의 2차 처리 방류수를 대상으로 하였다. 시료의 채취는 산세척, 에탄올 세척을 실시한 2 L 갈색 유리병을 최종적으로 3차

중류수로 세척하여 사용하였다. 채취한 시료는 Ice box로 수송하여 4℃로 유지되는 냉장고에 차광상태로 보관하여 실험을 실시하였다. 실험은 방류수를 채취해온지 7일 이내에 실시하였다.

9개 배출시설 중 5개는 하수종말처리장에서 4개는 농공단지 처리장을 대상으로 시료를 채취하였다. Table 1에 시료 채취지점에 대한 개략적인 제원을 나타내었다. 방류수 배출시설의 운영은 6개 지점은 활성 슬러지법에 의해 운영되었고, 회전 원판법(RBC)으로 운영되는 곳 2지점, 장기 폭기법을 사용하여 처리하는 곳이 1지점 이었다. 생활하수 처리장은 대부분 가정에서 배출되는 하수와 분뇨를 연계처리 하고 있었다. 농공단지 처리장의 경우에는 과일가공 폐수, 염색폐수, 음식물 가공폐수, 음료 및 렌즈 가공폐수 등이 주로 배출되고 있었다. 영산강으로 유입되는 대부분의 유량은 A와 B지점에서 배출되는 생활하수가 전체의 85.8%를 차지하였다.

### 2.2. 생 지표도 조사

어류를 이용한 생 지표 평가를 위해 정량화된 Ohio EPA (1989)의 Wading method에 기반을 두어 어류채집을 실시하였다.<sup>7)</sup> 채집은 정량화된 Catch per unit of effort(CPUE)를 위해 채집거리는 200 m로 조사구획 내 가능한 여울, 소 및 미약한 흐름이 있는 곳을 포함하였다. 채집시간은 본 기법에 의하여 60 min으로 하였으며, 채집도구는 비교적 규모가 적은 한국 하천상황을 고려하여 투망(망목 : 5×5 mm) 및 족대(1×1 mm)를 사용하였다.

조사 시기는 폭우 혹은 강우에 의한 영향이 최소로 나타날 것으로 예상된 2003년 10월 18일에서 10월 29일에 걸쳐 실시하였다. 조사지점은 영산강 수계 내 하수종말처리장 및 농공단지 처리장의 영향을 받는 지점인 A1, B1, C1, D1, E1, F1, H1, J1의 8개 지점을 대상으로 하였다. 이들 조사지점에 대한 대조군의 선정은 US EPA(1993)에 의거하여 선정하였다. C1에 대한 대조군으로 C-C1, D1의 대조군인 C-D1(상류), C-D2(하류) 그리고 J1의 대조군으로 C-J1 지점을 조사하여 어류의 생태 지표 종 특성에 대하여 분석하였다. 그러나 A1, B1, E1, F1, J1 지점에 대한 대조군은

Table 1. General characteristics of sampling site for whole effluent toxicity tests

Site	Treatment Method	Discharge(m <sup>3</sup> /day)	Wastewater type
A	activated sludge	600,000	factory/domestic waste
B	activated sludge	60,000	domestic waste
C	activated sludge	22,500	manure, domestic waste
D	RBC	11,000	manure, domestic waste
E	RBC	11,000	manure, domestic waste
F	extended aeration	600	fruit processing waste
H	activated sludge	1,300	dye, domestic waste
I	activated sludge	1,200	food/fruit waste
J	activated sludge	750	beverage/lens waste

적절한 하천이 존재하지 않았다. 조사지점 하천의 하천차수 및 특성은 Table 2와 같다.

채집된 어류의 분류는 현장에서 실시하였고, 분류 감별이 모호한 어종은 실험실로 운반 후 분류하였다. 비 정상어종의 외형적 감별은 US EPA(1993)의 방법에 따라 기형, 부식, 조직병리 및 종양으로 구분하였다.<sup>8)</sup> 어류의 군집분석은 Shannon-Weaver diversity index, Margalef's species richness index, Pielou's evenness index를 사용하여 분석하였다.

2.3. *Selenastrum capricornutum* 배양

본 연구에서 사용된 *S. capricornutum*은 US EPA에서 제시하는 방법을 사용하여 배양 및 표준시험을 시행하였다.<sup>9)</sup> 표준 독성시험에 사용된 *S. capricornutum*은 한국 화학연구소로부터 분양 받아 계대배양 하였다. *S. capricornutum*의 계대배양은 4 L 비이커에 starter를 식종한 후 온도가 25±1 °C로 유지되고 습도가 50%로 유지되는 clean room에서 배양을 실시하였다. 조명은 86±8.6 μE/m<sup>2</sup>/sec의 광도를 유지하고 광주기는 16 hr light, 8 hr dark 상태를 유지하며 배양하였다. 배양은 조류가 적절히 부양하여 성장하도록 100 cps로 진탕시키며 유지하였다.

조류의 배양액은 US-EPA/600/4-91/002에서 제시하는 배지를 3차 증류수를 사용하여 제조하였다.<sup>7)</sup>

2.4. *D. magna* 배양

*D. magna*의 배양은 US EPA 방법을 사용하였다.<sup>9)</sup> Test에 사용된 *D. magna*는 한국 화학연구소로부터 분양받아 계대배양 하였다. 분양받은 *D. magna*는 3 mL/L의 먹이 (*Selenastrum capricornutum* + YTC)가 주어진 배양액에 20~30마리/L의 밀도로 계대배양을 실시하였다. 배양에 사용한 배양액은 제조방법이 쉽고, 확실한 수질, 재현성 있는 결과를 얻기 위하여 증류수를 사용하여 제조하였다. 제조한

배양액은 pH가 7.6~8.0으로 유지되고 경도가 160~180, 알칼리도(alkalinity)가 110~120으로 유지되는 경수를 사용하였다. 전 방류수 독성 평가에 사용하기위한 계대배양은 온도가 25±1°C로 유지되고 습도가 50%로 유지되는 clean room에서 배양하였다. 조명은 10~20 μE/m<sup>2</sup>/sec의 광도를 유지하고 광주기는 16 hr light, 8 hr dark 상태를 유지하며 배양하였다.

2.5. 전 방류수 독성(Whole Effluent Toxicity) 시험

전 방류수 독성 시험은 *S. capricornutum*을 이용한 만성 독성 시험 및 *D. magna*를 이용한 급성독성 시험을 실시하였다. 독성평가에 사용된 방법은 US EPA에서 제시하는 test guideline을 따라 수행하였다.

*S. capricornutum*을 사용한 방류수의 전 방류수 독성 평가는 clean room에서 7일 동안 stock culture를 실시한 조류(algae)(약 1.5×10<sup>6</sup> cell/mL의 cell수포함)를 starter로 사용하였다. 방류수 농도별 3개 반복을 두었다. 시험에 사용된 용기는 100 mL 삼각플라스크를 사용하였으며, 시험용액은 50 mL로 하였다. 방류수의 농도는 6.25, 12.5, 25, 50과 100%(v/v)로 하였다. 실험에 사용된 방류수는 흡광도 분석 시의 영향을 제거하기 위해 0.2 μm hydrophilic nylon filter를 사용하여 여과를 실시하였다. 방류수의 회석에 사용된 물은 배양에 사용되는 합성 배지를 사용하였다. 시험 시 외부에서 유입되는 오염물질 및 박테리아 등의 영향을 최소화하기 위해 고무마개를 사용하여 입구를 막아 주었으며, 산소발생기를 이용한 산소공급은 실시하지 않았다. 시험은 96 hr 만성 독성 평가방법을 사용하였으며, 시험 시 적용된 온도 및 광 조건은 계대배양 시에 사용된 조건과 동일하게 사용하였다.

*S. capricornutum*을 사용한 전 방류수 독성 평가는 영양 염류에 의한 영향을 제거해 주기 위해 방류수 중에 존재하는 질산성 질소(NO<sub>3</sub>-N)과 인산염 인(PO<sub>4</sub>-P)의 농도를 각 회석배출별로 맞추어 주며 실험을 시행하였다.

*D. magna* 시험에 사용된 물벼룩은 clean room에서 개체 culture통해 배양한 물벼룩의 3번째 세대 이상의 어린개체들을 사용하였다. 실험의 정확성을 높이기 위해 사용된 새끼들은 태어난 지 24 hr 이내의 어린개체들을 사용하였다. 방류수 농도별 4개의 반복을 두었으며, 5마리씩의 어린개체들을 사용하였다. 시험에 사용된 용기는 30 mL 유리 vial을 사용하였으며 시험용액은 25 mL을 사용하였다. 방류수의 농도는 6.25, 12.5, 25, 50과 100%(v/v)로 하였다. 회석에 사용된 물은 *D. magna*의 배양에 사용되는 조제한 경수를 사용하였다. 방류수의 시험을 실시하기 전에 방류수의 상태가 물벼룩의 생육에 적절한 pH와 경도, 알칼리도(alkalinity)를 유지하고 있는지를 조사하였으며, 이들의 영향에 의해 물벼룩이 영향을 받지 않도록 조정하여 실험에 사용하였다. 시험은 48 hr 급성 독성 평가 방법을 사용하였으며, 시험을 실시하기 전 2시간 동안 충분한 먹이를 준 상태에서 독성평가를 수행하였다. 시험 기간 동안 먹이를

Table 2. Fish sampling sites. The site of C-C1 and C-J1 indicate the control for sites C1 and J1, respectively. The sites of C-D1 (upper site) and C-D2 (lower site) indicate the control for Site D1

Site	Stream Order	Site Characteristics
A1	3	A' plant effluent discharging vent
B1	5	B' planter effluent discharging vent
C-C1	3	C' plant effluent discharging vent upstream
C1	3	C' plant effluent discharging vent
C-D1	3	D' plant effluent discharging vent upstream
C-D2	2	D' plant effluent discharging vent downstream
D1	4	D' plant effluent discharging vent
E1	4	E' plant effluent discharging vent
F1	4	F' plant effluent discharging vent
H1	3	H' plant effluent discharging vent
C-J1	1	J' plant effluent discharging vent upstream
J1	3	J' plant effluent discharging vent

**Table 3.** Fish fauna and species distribution in the sampling sites. The site of C-C1 and C-J1 indicate the control for sites C1 and J1, respectively. The sites of C-D1 (upper site) and C-D2 (lower site) indicate the control for Site D1

No.	Site Sampled Species / Stream Order	A1 3	B1 5	C-C1 3	C1 3	C-D1 3	C-D2 2	D1 4	E1 4	F1 4	H1 3	C-J1 1	J1 4
1	<i>Anguilla japonica</i>			1									
2	<i>Cyprinus carpio</i>	2	9		4	1	1	1	4		5		
3	<i>Carassius auratus</i>	9	18		25	1		35	12	8	42		4
4	<i>Carassius cuvieri</i>	1	2		13				2	6	12		
5	<i>Rhodeus uyekii</i>					9	10			3			
6	<i>Rhodeus notatus</i>						3						
7	<i>Acheilognathus lanceolatus</i>			14		6	159	2					
8	<i>Acheilognathus yamatsuate</i>					1	6	4					
9	<i>Acheilognathus macropeterus</i>						3						
10	<i>Pseudorasbora parva</i>							7			2		
11	<i>Pungtungia herzi</i>				9	35	61	4		2	2		
12	<i>Sarcocheilichthys nigripinnis</i>				3	4							
13	<i>Squalidus gracilis majimae</i>		15				13				1		
14	<i>Hamibarbus labeo</i>		2										
15	<i>Hamibarbus longirostris</i>		4	17		18				6			
16	<i>Pseudogobio esocinus</i>			17	4	17	21	1	16	2			
17	<i>Abbotina rivularis</i>			3		3	5			4	5		
18	<i>Abbotina springeri</i>					3	34						
19	<i>Microphysogobio yaluensis</i>			60		8	50	18	21		5		
20	<i>Rhynchocypris oxycephalus</i>					2	3					17	
21	<i>Zacco temmincki</i>			122		62	79					23	
22	<i>Zacco platypus</i>	45	63	16		36	65	157	27	80	2		50
23	<i>Opsariichthys uncirostris</i>	16	8		4					20			
24	<i>Hemiculter eigenmanni</i>		11		16		2			19	3		
25	<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>			1		1						1	
26	<i>Iksookimia koreensis</i>												
27	<i>Cobitis lutheri</i>			9		2						11	
28	<i>Pseudobagrus fulvidraco</i>			3		11	2						
29	<i>Silurus asotus</i>			1									
30	<i>Hypomesus nipponensis</i>						28						
31	<i>Orizias latipes</i>			2									
32	<i>Siniperca scherzeri</i>			2					1				
33	<i>Lepomis macrochirus</i>				12				5				
34	<i>Micropterus salmoides</i>								5	5			
35	<i>Odontobutis platycephala</i>					8			1				
36	<i>Rhinogobius brunneus</i>			5		12	9					7	
37	<i>Channa argus</i>								1				
	Total Number of Species	5	9	15	9	20	19	9	11	11	10	5	2
	Total Number of Individual	73	132	273	90	240	554	229	95	155	79	59	54

주지 않았다. 온도 및 광도, 광주기는 개체배양과 동일하게 유지하였다.

**2.6. 데이터 분석 방법**

방류수 *S. capricornutum* 독성 평가 결과는 IC<sub>25</sub> 값을 사

용하였으며, D. magna 독성 평가 결과는 LC<sub>50</sub>으로 나타내었다. IC<sub>25</sub> 값은 통계적 처리방법을 사용한 US EPA에서 제시하는(US EPA/600/4-91/002, July, 1994) ICp program 을 LC<sub>50</sub> 값은 probit method, spearman-karber method, trimmed spearman-karber method에 의거하여 분석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 일반항목 수질 분석 결과

9개 하수 처리장 및 농공단지 방류수에 대한 pH, 알칼리도(Alkalinity), 경도 분석을 실시하였다. pH는 대부분의 지점에서 중성정도의 pH를 나타내었다. 경도 분석 결과에 따르면 moderately hard water(75~150 mg/L as CaCO<sub>3</sub>)나 hard water(150~300 mg/L as CaCO<sub>3</sub>)의 특성을 나타내었다. 알칼리도(alkalinity)는 UN 수질기준에 의거 5개 지점(B, C, D, E, F)에서 산성화정도 III등급을 나타내었고, 2개 지점(A, I)에서 II등급, 2개 저점(H, J)에서 I등급의 수질 지표를 나타내었다. 따라서 수소이온농도 및 경도에 대한 수질 영향은 크지 않은 것으로 나타났다.

#### 3.2. 생 지표도 평가 결과

9개 방류수 배출지역에 하천에 대한 생 지표도 평가 결과 나타난 어류의 현황을 Table 3에 나타내었다. Table에서 알 수 있듯이 채집결과 뱀장어과 1종, 잉어과 24종, 미꾸리과 2종, 등자개과 1종, 메기과 1종, 빙어과 1종, 송사리과 1종, 꺾지과 1종, 김정우럭과 2종, 동사리과 1종, 망둑어과 1종, 가물치과 1종으로 총 12과 37종 2033개체가 채집되었다. 본 조사기간중 채집된 외래어종은 떡붕어, 블루길, 베스의 3종으로 나타났다. 특히 화학적 오염에 대한 내성이 강한 종으로 알려진 떡붕어의 경우는 대조군 조사지점에서는 전혀 출현하지 않았다. 조사지점에 대한 종수 분포에 따르면, 12개 지점에 대한 평균 종수는 10종(산술평균 : 10.4)으로 A1, B1, C1, D1, J1 지점에서는 뚜렷한 종수감소를 보여 방류수에 대한 직/간접적인 영향이 있을 것으로 사료된다.

지점별 종수는 Fig. 1에서 보여주는 바와 같이 C1, D1, J1 지점에서는 대조군과 비교하여 뚜렷한 종수의 감소를 보이고 있다. 특이할 만하게 C-J1 지점의 낮은 종수는 최상류 1차 하천의 일반적인 특성에 의한 것으로 판단되었다.

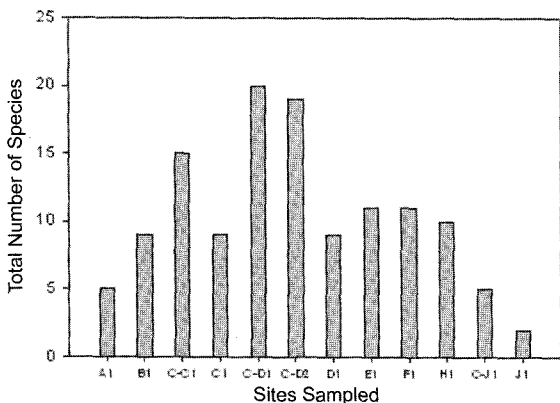


Fig. 1. Total number of fish species in the sampling sites. The site of C-C1 and C-J1 indicate the control for sites C1 and J1, respectively. The sites of C-D1 (upper site) and C-D2 (lower site) indicate the control for Site D1.

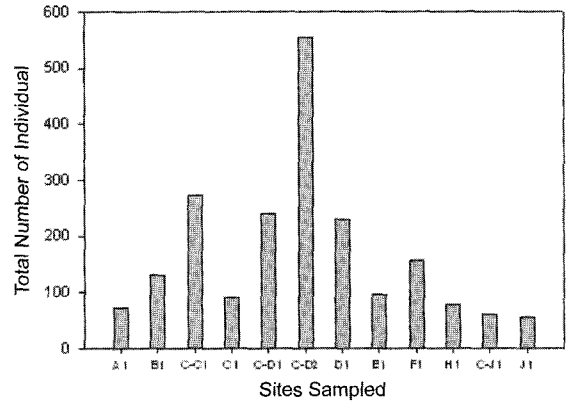


Fig. 2. Total number of fish individual in the sampling sites. The site of C-C1 and C-J1 indicate the control for sites C1 and J1, respectively. The sites of C-D1 (upper site) and C-D2 (lower site) indicate the control for Site D1.

지점별 CPUE 채집법에 따른 개체수(Fig. 2)를 살펴보면 A1, C1, E1, H1, J1 지점에서 100개체 이하의 뚜렷한 군집 내 개체 수 감소를 보였다. 대조군 지역인 C-C1, C-D1, C-D2, 지점은 200개체 이상으로 높은 종의 수를 보였으며, C-D2 지점에서는 500개체 이상의 높은 값을 나타내었다.

지점별 종 풍부도는 Fig. 3에서 보여주는 바와 같이 C-C1, C-D1, C-D2 지점의 종 풍부도 지수는 2.0 이상으로 나타났다. 그러나 A1, B1, C1, D1, J1 지점에서는 종 풍부도 지수가 다른 지역보다 낮게 나타나고 있었다.

지점별 군집 균등도 지수는 Fig. 4에 나타내었다. 균등도 지수는 종이 군집 내에 얼마나 균등하게 분포하는가를 제시한 내용으로 D1과 J1 지점에서 뚜렷한 감소를 나타내었다. 이들 지점에서는 오염에 내성이 강한 *Zacco platypus*가 우점하여 나타났다. 그러나 대조군 지점들은 균등도 지수가 6.0으로 높게 나타났다.

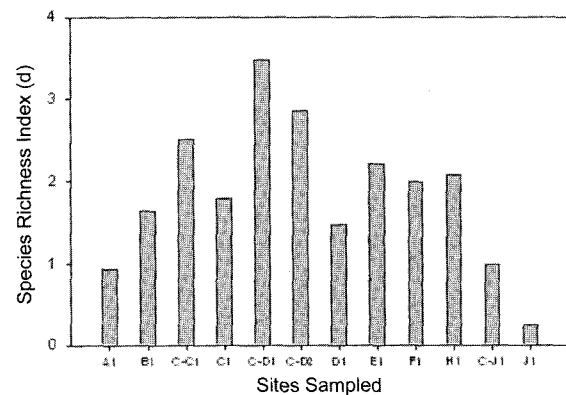


Fig. 3. Richness index of fish species (d), based on Margalef's approach, in the sampling sites. The site of C-C1 and C-J1 indicate the control for sites C1 and J1, respectively. The sites of C-D1 (upper site) and C-D2 (lower site) indicate the control for Site D1.

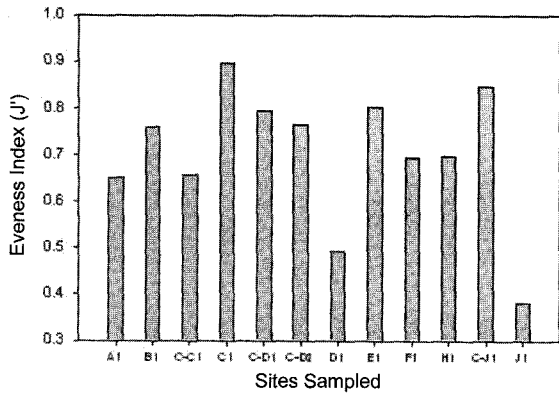


Fig. 4. Pielou's evenness index (J') in the sampling sites. The site of C-C1 and C-J1 indicate the control for sites C1 and J1, respectively. The sites of C-D1 (upper site) and C-D2 (lower site) indicate the control for Site D1.

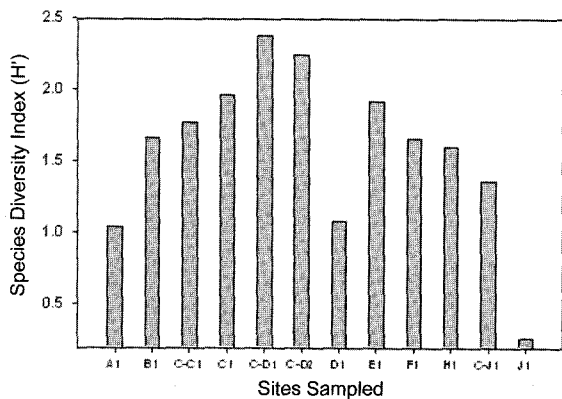


Fig. 5. Shannon-Wiener diversity index (H') in the sampling sites. The site of C-C1 and C-J1 indicate the control for sites C1 and J1, respectively. The sites of C-D1 (upper site) and C-D2 (lower site) indicate the control for Site D1.

지점별 종의 다양 정도를 Fig. 5에 나타내었다. 그래프에서 알 수 있듯이 A1, D1, J1 지점에서 매우 낮은 종의 다양성을 나타내었다. D1지점과 J1 지점은 대조군 지점인 C-D1, C-J1지점과 비교하여 각각 2배와 5배 이상의 종의 감소를 보였다.

### 3.3. 전 방류수 독성 평가

영산강 수계로 배출되는 9개 하수종말처리장을 대상으로 전 방류수 독성평가를 수행하였다. 이들 처리장은 해당연도의 배출허용기준인 생물학적 산소 요구량(BOD) 30 ppm, 부유물질(SS) 30 ppm, 총 질소(TN) 60 ppm, 총 인(TP) 8 ppm 등의 배출 허용기준을 만족시키는 처리장이었다. *D. magna*와 *S. capricornutum*을 사용한 전 방류수 독성 평가 결과는 Table 4로 요약된다. *S. capricornutum*은 IC<sub>25</sub> 값으로 표기하였고 *D. magna*의 결과는 LC<sub>50</sub>값으로 표기하였다. 본 표에서 보여 지듯이 *S. capricornutum*의 경우는 1차와 2차에 대한 독성 평가 결과를 얻지 못하는데 이는 방류수

중에 존재하는 영양염류의 영향을 고려하지 않은 상태에서 실험을 실시하였기 때문이다. *S. capricornutum*과 *D. magna*의 독성 평가 결과를 살펴보면 대부분의 조사지점에서 독성을 나타내는 *S. capricornutum*이 *D. magna*보다 더 민감하게 독성에 반응하고 있는 것을 알 수 있다. 또한 *S. capricornutum*에서 독성이 나타나지 않는 경우에도 *D. magna*는 독성 값을 나타내고 있는 것(D지점 3차, E지점 4차 방류수 독성평가 결과)으로 미루어 보아 조류(algae)와 물벼룩의 화학물질에 대한 독성 영향기작이 서로 다르게 나타나고 있는 것을 알 수 있다. *S. capricornutum*을 사용한 독성 평가 결과에서는 모든 지점에서 높은 독성 값을 나타내었으며, 특히 F 지점과 I 지점에서 매우 높은 5.03, 5.33과 12.23의 값을 나타내었다. *D. magna*를 사용한 독성 평가 결과는 D 지점에서 가장 많은 횟수인 4회의 독성 발현이 나타났으며, E지점과 F지점에서 각 3회씩의 독성 값을 나타내었다. B지점과 C지점에서는 2번, H지점과 I지점에서는 1번의 독성 값을 나타내었다. 그러나 A지점과 J 지점에서는 독성 값을 나타내지 않았다. 이들 두 지점은 수서 무척추 동물에는 독성영향을 나타내지는 않았지만, *S. capricornutum* 독성 평가 결과에서는 TU 값에 의거할 때 1.31~1.47(A), 1.58~2.03(J)의 독성 효과를 보였다. 하천 등의 수서 생태계의 독성 영향은 단순 개별 생물종의 독성 평가로 예측할 수 있을 뿐만 아니라 먹이사슬을 통해서도 이루어 질 수 있다. 조류 등을 먹고 사는 물벼룩은 조류에 독성 영향을 나타내게 되면 먹이사슬을 통해 어류 등 고등 생물체의 종이나 개체수 변화 등에 영향을 미칠 것으로 판단된다. 따라서 본 전 방류수 독성 평가로부터 얻어진 결과로 살펴보면 모든 방류수 배출지점 하천에서 독성 영향이 나타날 것으로 판단되며, 특히 두 가지 종에서 독성이 고루 나타나고 있는 D, F, E 지점의 하천에서는 큰 생태적 영향이 나타날 수 있을 것이다. 그러나 F지점과 E지점의 처리장은 하천에 유입되는 양이 하천 유량에 비해 상대적으로 적어 실제 영향은 크게 나타나지 않을 수도 있을 것으로 판단되었다. 반면에 A지점과 B지점은 많은 배출 유량으로 인하여 하천에 미치는 영향이 높게 나타날 수 있을 것으로 사료된다. 이러한 결과는 후반부(3.4절)에서 논의 되어있다.

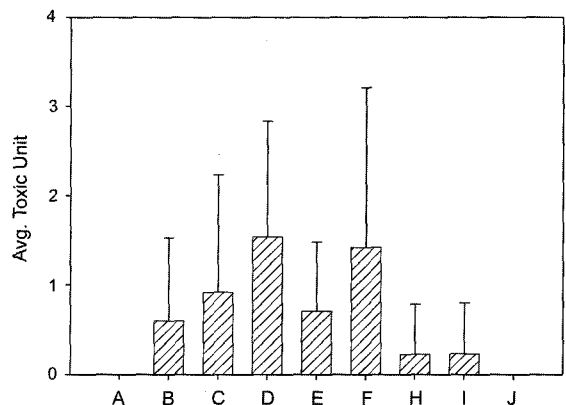


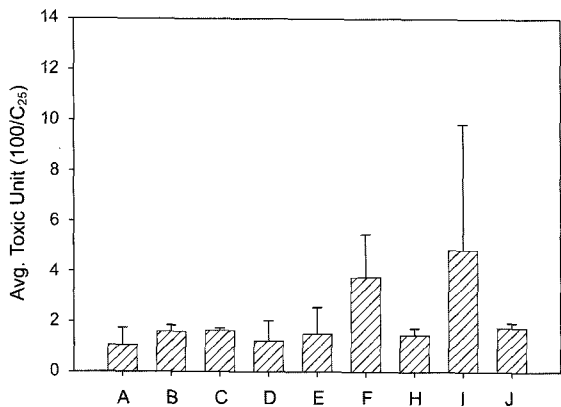
Fig. 6. The average toxic units for 9 wastewater treatment plants using the test species of *D. magna*.

**Table 4.** Whole effluent toxicity result in the wastewater treatment plants using the test species of *D. magna* based on LC<sub>50</sub> values and *S. capricornutum* based on IC<sub>25</sub> values

site/sampling time	LC <sub>50</sub>	TU	IC <sub>25</sub>	TU	site/sampling time	LC <sub>50</sub>	TU	LC <sub>50</sub>	TU	
A	1st	> 100%	< 1	NA	F	1st	> 100%	< 1	NA	
	2nd	> 100%	< 1	NA		2nd	35%	2.86	NA	-
	3rd	> 100%	< 1	76.3%		3rd	21.6%	4.23	19.9%	5.03
	4th	> 100%	< 1	> 100%		4th	> 100%	< 1	57.8%	1.73
	5th	> 100%	< 1	70.5%		5th	71%	1.41	18.7%	5.33
	6th	> 100%	< 1	68.0%		6th	> 100%	< 1	34.3%	2.91
B	1st	44%	2.27	NA	H	1st	> 100%	< 1	NA	
	2nd	> 100%	< 1	NA		2nd	> 100%	< 1	NA	-
	3rd	> 100%	< 1	77.5%		3rd	> 100%	< 1	88.5%	1.13
	4th	89%	1.12	65.4%		4th	73%	1.36	65.4%	1.53
	5th	>100%	0.2	60.8%		5th	> 100%	< 1	68.3%	1.46
	6th	> 100%	< 1	52.4%		6th	> 100%	< 1	56.6%	1.77
C	1st	30%	3.33	NA	I	1st	> 100%	< 1	NA	
	2nd	> 100%	< 1	NA		2nd	> 100%	< 1	NA	-
	3rd	> 100%	0.7	65.8%		3rd	> 100%	< 1	27.7%	3.61
	4th	68%	1.46	61.7%		4th	> 100%	< 1	59.5%	1.68
	5th	> 100%	< 1	58.0%		5th	72%	1.39	8.2%	12.23
	6th	> 100%	< 1	59.5%		6th	> 100%	< 1	53.6%	1.86
D	1st	71%	1.41	NA	J	1st	> 100%	< 1	NA	
	2nd	47%	2.13	NA		2nd	> 100%	< 1	NA	-
	3rd	35%	2.83	> 100%		3rd	> 100%	< 1	49.2%	2.03
	4th	35%	2.83	61.3%		4th	> 100%	< 1	63.3%	1.58
	5th	> 100%	< 1	56.0%		5th	> 100%	< 1	57.6%	1.73
	6th	> 100%	< 1	69.8%		6th	> 100%	< 1	60.5%	1.65
E	1st	71%	1.41	NA						
	2nd	> 100%	< 1	NA						
	3rd	71%	1.41	41.3%						
	4th	71%	1.41	> 100%						
	5th	> 100%	< 1	57.1%						
	6th	> 100%	< 1	53.6%						

LC<sub>50</sub> : the lethal concentration that causes 50% death for the test organisms, TU : Toxic Unit = 100% effluent/%LC50 effluent for mortality > 50%, Toxic Unit = 0.02×% mortality for 10% < mortality < 49%

IC<sub>25</sub> : the Inhibition concentration that causes 25% reduction in number of test organisms, TU : Toxic Unit(100% effluent/%IC25 effluent)



**Fig. 7.** The average toxic units for 9 wastewater treatment plants using the test species of *S. capricornutum*.

Fig. 6과 7에 *D. magna*와 *S. capricornutum*을 사용한 전 방류수 독성 평가 결과는 TU의 평균값으로 나타내었다. Fig. 6에서 살펴보면 D지점과 F지점에서 높은 평균 독성 값을 나타내는 것을 볼 수 있다. 또한 모든 지점에서 독성 값의 편차가 매우 크게 나타나고 있다. 따라서 이들 지역에 대한 독성의 변화가 크게 나타나고 있는 것을 알 수 있다.

생활하수와 농공단지 방류수에 대한 독성 평가 결과는 Fig. 7와 Fig. 4로 요약된다. Fig. 3에 나타난 9개 처리장에 대한 평균 TU값의 결과를 살펴보면 위에서 높은 독성 값을 보였던 F지점과 I지점에서 매우 높은 독성 평균값(각각 3.75, 4.85)을 보였으며, 독성 값이 높게 나타난 이들 두 지점에서 독성 변화 표준편차도 높게 나타났다. 이들 두 지점을 제외한 나머지 7개 지점은 TU의 평균값이 1.05 <

TU < 1.75로 나타나 모든 지점에서 지속적으로 독성을 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 또한 이들 독성 변화의 편차도 매우 낮게 나타나고 있어 하수처리장 방류수나 농공단지 처리장 방류수의 경우 독성이 우발적 사고에서 발생하는 경우가 아니면 조류를 사용한 독성은 거의 일정하게 나타나고 있는 것을 알 수 있다.

### 3.3. 생지표도와 전 방류독성 평가와의 비교 결과

Fig. 1에서 5까지에 나타난 생 지표도 평가 결과와 Table 7에 나타난 조류 및 물벼룩에 대한 독성 평가 결과를 비교하여 보았다. Fig. 1에 나타난 총 종의 수에서 대조군보다 큰 감소를 보인 C1, D1 지점은 전 방류수 독성 평가에서도 높은 독성을 나타내는 지역으로 방류수에 의한 영향이 크게 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 대조군에 대한 J1 지역의 종의 감소는 *D. magna*의 독성 평가 결과에서는 예측할 수 없었으나, *S. capricornutum*의 평가 결과에서 예측해 볼 수 있었다. 따라서 J1 지역도 방류수에 의한 독성 영향이 나타나고 있는 것을 알 수 있었다. 대조군이 없는 A1, B1, E1, F1, H1 지역은 타 지역의 대조군과 비교하여 보았을 경우 적지 않은 종의 수 감소가 나타나고 있는 것을 알 수 있다. *D. magna* 독성을 나타내지 않은(*S. capricornutum* 독성은 나타남) A1지역과 J1지역에서의 종의 감소는 A1지역의 유량이 하천의 유량에 비해 매우 큰 영향에서 기인할 것으로 예상되며, J1지역은 유입되는 하천의 유량이 매우 적기 때문에 배출되는 낮은 독성의 방류수가 종의 수에 영향을 끼쳤을 것으로 사료된다. 또한 J1 지역은 최상류의 1차 하천으로 낮은 종이 분포할 것으로 예상되었다.

Fig. 2에 나타난 군집 내 총 개체수의 결과를 WET test 결과와 비교하여 보면, A1, C1, E1, H1, J1 지점에서는 대조군 및 다른 지역보다 매우 낮은 100개체 이하의 개체수를 보였다. 이들 지점 중 C1, E1, H1 지점은 방류수 독성 평가 결과에서도 높은 독성 값을 나타내는 지역으로 개체수 감소가 예상되었다. A1 지점은 *S. capricornutum* 독성만 나타나고 있으나 배출되는 유량이 매우 크기 때문에 방류수가 배출되는 하천에 큰 영향이 나타나고 있는 것으로 사료된다.

Fig. 3에 나타난 종 풍부도 지수 평가에서 방류수 독성 평가결과에서 독성이 매우 높았던 B, C, D 지점에서 낮은 종 풍부도 지수를 보였다. 1차 하천인 J지점과 방류수의 유량이 매우 큰 A지점에서도 낮은 종의 풍부도 지수를 보였다.

Fig. 4에 나타난 종의 균등도 지수 결과를 방류수 독성 평가 결과와 비교하여보면, 독성이 매우 높은 것으로 나타났던 D지점(D1)과 낮은 독성을 갖고 있더라도 하천 유량이 매우 적었던 J지점(J1)에서 오염에 내성이 강한 종이 우점하는 것으로 미루어 보아 하수처리장에서 배출되는 방류수의 영향이 하천에 큰 영향을 주고 있는 것으로 판단되었다. 다른 지점들은 대조군과 비교하여 종의 균등도가 크게 감소하지 않은 것으로 나타났다.

Fig. 5에 종의 다양성 지표 결과를 나타내었다. 이 결과에서도 독성이 강한 것으로 나타났던 D1 지점에서 대조군 및 타 지역보다 낮은 종의 다양성 지표를 보였다. 또한 낮은 독성을 나타내고 있더라도 배출유량이 많았던 A1지점에서도 낮은 종의 다양성 지표가 나타났다. J1 지점의 낮은 다양성 지표는 낮은 하천 유량에 의해 방류수가 높은 독성 영향을 준 것으로 판단된다.

위의 생 지표도 결과와 방류수 독성 평가 결과를 종합하여 보면 가장 독성이 높은 것으로 판단되었던 D지점의 하천(D1)에서는 수생생태계가 매우 큰 천이를 나타내고 있었다. 또한 *S. capricornutum*에 의해서만 독성이 나타났던 A1과 J1 지점에서도 큰 수생 생태계 변이가 나타나고 있었다. A1 지점은 매우 큰 유량에 의해서 낮은 독성이 유지되었지만 수생 생태계에 큰 영향을 나타낸 것으로 판단되었다. 이외의 C1, E1 등 WET 결과에서 높은 독성이 나타났던 지점에서는 수생생태계에 개체 수 감소나 종 풍부도 감소 등 여러 가지로 방류수의 영향이 나타나고 있는 것으로 판단되었다. 모든 하천에서 대조군보다는 생태계의 교란이 일어나고 있는 것을 보였다. 이는 *S. capricornutum* 결과 모든 지역에서 독성이 나타나고 있는 것을 보아 방류수의 방류에 의해서 나타나는 것으로 예측되었다.

## 4. 결론

전남지역에 존재하는 9개 하수종말처리장과 이들의 방류수가 배출되는 하천에 대한 전 방류수 독성평가 및 생지표도 평가 결과는 다음과 같이 요약된다.

- 1) *D. magna*와 *S. capricornutum*의 독성이 나타나고 있는 C1, D1 지점에서는 뚜렷한 종 다양도 감소현상을 보였다. *S. capricornutum* 독성을 나타내는 J1 지점에서도 대조군보다 낮은 종의 수를 보였다.
- 2) *D. magna*와 *S. capricornutum*의 독성이 나타나는 C1, E1, H1 지점에서 뚜렷한 개체 수 감소현상을 보였다. 또한 *S. capricornutum*의 독성이 나타나는 A1과 J1 지점에서도 동일하게 개체 수 감소현상을 나타내었다.
- 3) B1, C1, D1 등 높은 독성이 나타난 지점에서는 매우 낮은 종의 풍부도를 보였으며, *S. capricornutum*독성이 나타난 A1과 J1지점에서도 낮은 종의 풍부도를 나타내었다.
- 4) 전 방류수 중에서 가장 높은 독성을 나타냈던 D1 지점은 오염에 내성이 강한 종으로 하천의 우점종이 변화되었다.

이와 같이 기존의 방류수 모니터링으로 적절하게 배출되고 있다고 하더라도 생물학적 독성 평가결과(WET)에서 독성이 나타나고 있으며, 이는 하천의 생태계변화에도 밀접한 관련이 있는 것으로 나타났다. 따라서 향후 하천 생태계 보존 및 관리를 위해서 방류수에 대한 체계적인 농도 규제 및 생물학적 독성 규제가 반드시 필요할 것으로 사료된다.



## 사 사

본 연구는 2002년도 차세대 핵심환경 기술개발 사업의 일환으로 환경부의 지원 하에 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. 환경부자료, 2003년 말 기준 가동 중인 하수처리장 현황, 생활하수과(2004).
2. 국제환경문제연구소, "환경관계법규(수질환경 보존법)," 동화기술, pp. 1~11(1999).
3. Peter, M. C., "Whole Effluent Toxicity testing-unusefulness, level of protection, and risk assessment," *Environ. Toxicol. Chem.*, **19**, 3~13(2000).
4. US EPA, "Technical support document for water quality-based toxics control," EPA/505/2-90-001(1991).
5. 나진성, 김기태, 김상돈, 독성 반응곡선을 이용한 수계 주요 오염물질의 혼합독성평가, *대한환경공학회지*, **27**(1), 67~74(2005).
6. 나진성, 김기태, 김상돈, *Daphnia magna*와 *Selenastrum capricornutum*을 사용한 하수처리장 방류수의 생물독성평가, *대한환경공학회지*, **26**(12), 1326~1333(2004).
7. US EPA, "Method for measuring the acute toxicity of effluents and receiving waters to freshwater and marine organism," EPA/600/4-90/027F(1993).
8. US EPA, "Fish field and laboratory methods for evaluating the biological integrity of surface waters," EPA 600-R-92-111, US EPA, Cincinnati, Ohio, USA(1993).
9. Ohio EPA, "Biological Criteria for the Protection of aquatic life, Vol. III, Standardized biological field sampling and laboratory method for assessing fish and macro invertebrate communities," Ohio EPA, USA(1989).