

물벼룩(*Daphnia magna*)을 이용한 부산시 도심하천 및 수로의 독성평가

윤나나[†] · 김미희 · 강성원 · 권기원 · 빈재훈 · 박호국
환경조사과

Bioassay of Stream and Watercourse in Busan using the Water Flea(*Daphnia magna*)

Na-Na Yoon[†], Mi-Hee Kim, Sung-Won Kang, Ki-Won Kwon, Jae-Hun Bin and Ho-Kug Park
Environmental Research Division

Abstract

In order to evaluate bioassay on four streams and one watercourse in Busan, this study performed a toxic test by using *Daphnia magna*, analyzed factors affecting toxicity through correlation analysis between the toxic value of *Daphnia magna* and physicochemical parameters, and figured out the comprehensive condition of streams.

It was identified that toxicity was not observed at all in Daechon Stream and therefore the stream is healthy without risk. Oncheon Stream did not show toxicity during a normal times. However, during an first flush rainfall, it showed the average toxic value of 6.28 TU. This is because that contaminated matter in overtopping dirty water from streams generated toxicity through interaction. In case of Dong Stream, *Daphnia magna* toxicity is 0.47 TU due to high Cu and salinity. As the result of correlation analysis, salinity ($r=0.917$) and the toxic value showed a high correlation.

In case of stream inflowed from Ilgwang mine, *Daphnia magna* toxicity is 22.25 TU due to low pH and high Cu. As the result of correlation analysis, Cu ($r=0.982$) and the toxic value showed a high correlation. In case of Gamjeon Watercourse, it showed the highest pollution load such as organic matter and heavy metals and the highest toxic value of 32.90 TU. In Gamjeon Watercourse, the high density of Cu, Zn, and Cr were detected enough to generate toxicity. As the result of correlation analysis, the highest correlation between Zn ($r=0.927$) and the toxic value was identified.

There is limitation in the current evaluation of water quality. Therefore, it is thought that a comprehensive method including bioassay is desirable to evaluate water quality.

Key Words : *Daphnia magna*, Bioassay, Toxicity, TU

서 론

환경부의 물환경관리 기본계획(2006)에 따르면 물환경 정책이 종전까지 BOD 등 오염물질 관리 위주에 초점이 맞춰져 있었다면, 최근에는 이러한 개별 오염물질이 수계에 혼합되었을 때 수생태계에 미치는 위해성 및 생태성에 대한 종합 관리에 초점이 맞춰져 있다.

수계에는 여러 가지 오염물질이 산재하고 서로 상호작용을 일으킬 수 있기 때문에 기존의 이화화학적 수질 평가만으로는 위해성을 평가하기 힘들며, 위해성 여부를 판단하기 위해서는 통합독성평가가 이루어져야하는데 이러한

독성 영향을 살펴 볼 수 있는 방법으로 생물검정 또는 생물모니터링이 있다. 이러한 생물을 이용한 검정방법은 수계의 오염을 총체적으로 평가할 수 있고, 잠재적인 독성 여부를 결정하는데 많은 도움을 줄 수 있으며, 이화학적 분석에 보완적으로 사용될 수 있다. 물론 독성원인 물질에 대한 정보를 얻기가 힘들기는 하지만 생물학적인 독성방법은 전체적인 위해성을 평가하는데 기초 자료를 제공할 수 있다¹⁾.

위해성 평가의 일환으로 사용되는 생물검정(bioassay)은 어떤 물질이 시험 유기체의 신진대사, 번식의 감소, 생체기능의 상실이나 치사 등에 미치는 영향을 조사 분석함

[†] Corresponding author. E-mail:nana2@korea.kr
Tel:+82-51-758-6123, Fax:+82-51-753-1424

으로써 오염물질의 유해성을 결정하는 방법이다²⁾. 생물검정에는 일반적으로 발광박테리아, 조류, 물벼룩, 어류, 수서 곤충 등의 수생생물이 많이 이용되고 있는데 그 중에서도 물벼룩은 높은 번식력, 짧은 생활사, 시험의 용이성, 독성물질에 대한 민감성, 결과의 중복성이 크기 때문에 오랜 기간 여러 가지 독성물질을 평가하는데 유용하게 사용되어져 왔다^{3,4)}.

물벼룩 독성에 관한 연구는 국내외적으로 많이 진행되어오고 있으며, 현재 국내 연구현황을 살펴보면 주요 4대강의 상수원 등에서 물벼룩을 이용한 독성물질조기경보체계가 운영 중이며, 환경부에서도 폐수에 존재하는 전체 유해물질의 독성을 통합적으로 관리하는 방안으로 2007년 1월 물벼룩 생태독성 배출허용기준에 대한 입법을 예고하였고 2011년부터는 산업폐수 생태독성 관리제도를 실시할 예정으로, 이에 발맞추어 국내에서도 산업폐수 방류수에 관한 독성시험이 활발히 이루어지고 있으나 방류수가 최종적으로 유입되는 하천수계에 대한 독성 기초 자료가 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 혼합물의 독성상호작용을 인지하는데 효과가 뛰어난 물벼룩(*Daphnia magna*)을 이용하여 부산시 하천 및 수로에 대한 독성수준을 평가하고 수질항목과 생물독성과의 상관분석을 통해 포괄적인 하천 수질을 분석함으로써 향후 하천의 생태성 종합 관리에 관한 정책 수립시 기초자료로 제공하고자 하였다.

실험재료 및 방법

부산시 하천 4개 지점, 수로 1개 지점에서 시료를 채취한 다음 물벼룩(*Daphnia magna*)을 이용하여 급성독성시험을 수행하고 BOD 등 일반수질항목과 중금속 항목을 분석하여 그 결과값과 생물독성값과의 상관성을 분석함으로써 부산시 하천의 독성 수준을 평가하였다.

시료채취지점 및 시기

부산시 하천 중 양호한 수질을 유지하고 있는 대천천, 자연형 하천 복원 사업이 진행중인 온천천, 동천환경개선 사업으로 점차 수질이 개선되고 있는 동천, 각종 중금속이 용출되어 있는 일광광산 배수 유입하천과 부산시에서 오염 부하량이 가장 높은 감천수로 총 5개 지점을 선정하여 총 6차례 시료를 채취하여 분석하였다.

물벼룩(*Daphnia magna*)

물벼룩은 소형 갑각류로서 전 세계적으로 11과 52속 450여 종이 있으며, 시험에 사용한 *Daphnia magna*는 절지동물문 갑각강 지각목 물벼룩과(Family Daphniidae,

Order Cladocera, Class Crustacea, Phylum Arthropoda)에 속한다^{2,5)}.

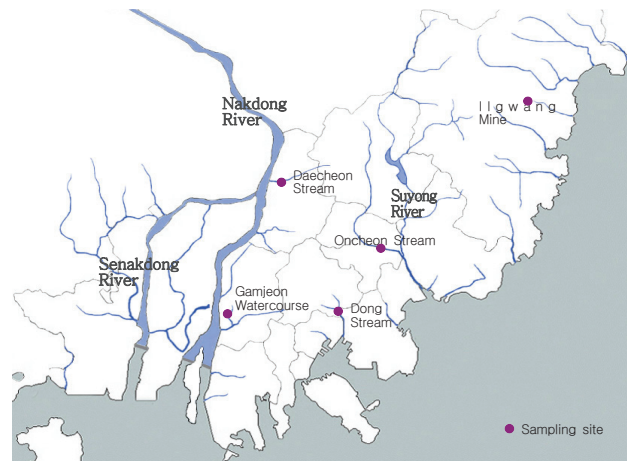


Fig. 1. Sampling sites in Busan metropolitan streams

*Daphnia magna*의 배양 최적 온도는 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 로서 사육실의 온도를 이 범위내로 유지하기 위하여 냉난방기를 사용하였으며, 먹이는 상업용 Chlorella를 하루에 한번 일정한량을 공급하였다. 조명은 500~1000Lux로 16시간은 light, 8시간은 dark로 유지하였으며, 배양액으로는 미국 EPA에서 제시한 Hard water를 사용하였다. 본 시험에 사용한 *Daphnia magna*는 국립환경과학원 낙동강물환경연구소에서 분양받아 사용하였다.

이화학적 분석

이화학적 항목으로 pH, BOD, $\text{NH}_3\text{-N}$, 중금속 등 총 16개 항목을 수질오염공정시험기준(환경부, 2008년)에 의거하여 분석하였으며, 각 항목의 측정방법은 Table 1과 같다.

생물독성평가

물벼룩 급성독성시험

US EPA의 표준 독성시험법⁶⁾에 따라 물벼룩을 이용한 48시간 급성독성시험을 실시하였다. 먼저 채취한 시료를 GF/C(pore size : $0.45\mu\text{m}$)로 여과한 다음 폭기하여 DO 4 mg/L 이상 되게 하였고, 시료온도는 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 로 맞추었으며 Hard Water를 이용하여 희석하였다. 대조군을 포함하여 2배 희석방법에 의해 최소 5~7단계의 농도로 독성시험을 실시하였으며 각 농도당 시료 50 mL를 비이커에 넣고 물벼룩 5마리씩 넣어 4번 반복 실험을 하였다. 관찰최종점(endpoint)은 유영저해(immobilization)로서 48시간 동안 관찰하여 시료농도(시험수 중 하천수 함유율(%))와 유영저해를 보이는 물벼룩의 비율(%) 사이의 관계를 통해 물벼룩의 50%가 유영저해를 받는 시료농도(EC_{50})를 구하였다.

Table 1. The physicochemical parameters and their analytical method

Parameter	Unit	Method
pH	-	YSI 556
Salinity	‰	YSI 556
DO	mg/L	YSI 556
BOD	mg/L	Winkler-azide
COD	mg/L	Mn oxidation method
SS	mg/L	Filtered and Dried at 103~105°C
T-N	mg/L	Photometric method(BRAN+LUEBBE)
T-P	mg/L	Photometric method(BRAN+LUEBBE)
NH ₃ -N	mg/L	Absorptiometric Analysis
Cd	mg/L	ICP-MS(Agilent 7500)
Pb	mg/L	ICP-MS(Agilent 7500)
Hg	mg/L	ICP-MS(Agilent 7500)
Cu	mg/L	ICP-MS(Agilent 7500)
Zn	mg/L	ICP-MS(Agilent 7500)
As	mg/L	ICP-MS(Agilent 7500)
Cr	mg/L	ICP-MS(Agilent 7500)

표준지표독성시험(Standard Reference Toxicity Test)

독성시험에 사용되는 시험동물은 독성물질에 대한 민감도가 일정하게 유지되어야 하며, 잘 통제된 환경에서 정해진 시험절차를 따라야 한다. 이를 확인하기 위하여 K₂Cr₂O₇를 지표독성물질로 사용하여 표준지표독성시험을 수행하였다. ISO에서는 용존산소농도가 2 mg/L이상, 대조구의 유영 저해율이 10%이하이며 표준지표독성물질인 K₂Cr₂O₇의 24시간 EC₅₀값이 0.9~2.0 mg/L의 범위 내에 있으면 시험이 정당하게 이루어졌음을 인정한다고 하였다⁷⁾. K₂Cr₂O₇를 이용한 표준지표독성시험 결과, 24시간 EC₅₀값이 0.91~1.14 mg/L로 ISO에서 정한 범위 내에 있는 것으로 확인되었으며 그 결과는 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Acute responses (EC₅₀) of test organisms to a standard toxicant, K₂Cr₂O₇, demonstrating the inherent variability of the toxicity test

	K ₂ Cr ₂ O ₇ EC ₅₀ (mg/L)			Mean	SD	CV(%)
	1	2	3			
24h	1.14	0.96	0.91	1.003	0.121	12.1

생물독성값과 이화학적항목 분석값간의 상관성 분석

US-EPA에서 제시하는 probit method를 이용하여 EC₅₀값을 구하였고, 이를 아래와 같은 식에 의하여 독성단위(Toxic Unit, TU)로 전환하였다.

$$TU = 100/EC_{50} \text{ 값}$$

단, 100% 시료에서 물벼룩의 0~10%에 영향이 있을 경우 TU=0, 물벼룩 10~49%에 영향이 있을 경우 0.02×영향 받은 퍼센트로 TU를 계산한다. (수질오염공정시험기준 제4장 제49항)

이화학적항목 분석값과 물벼룩 독성값간의 상관성 분석은 SPSS for Windows(ver. 13.0) 프로그램을 사용하여 pearson 상관분석을 하였다.

결과 및 고찰

대천천의 물벼룩 독성결과

대천천의 수질결과는 BOD 0.2~1.8 mg/L, COD 1.6~3.4 mg/L, T-N 1.519~2.857 mg/L 등으로 채취시기에 따라 강우량이 최대 약 100mm 정도 차이가 났으나 강우에 관계없이 수질의 변동은 거의 없었다. 단 SS는 Fig. 2에서와 같이 4차 채취 시 높았는데 이는 강우의 영향으로 주변 토사가 유입되었기 때문이다. 대천천의 중금속 항목은 Table 3과 같이 Cu, Zn이 조금 검출되었을 뿐 다른 중금속은 모두 불검출로 나타났다.

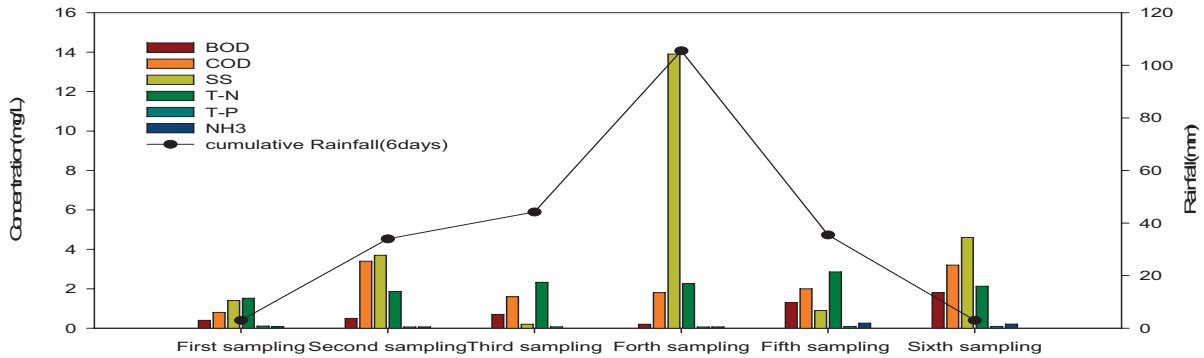


Fig. 2. Water quality of Daecheon Stream

Table 3. Water quality of Daecheon Stream

	First sampling	Second sampling	Third sampling	Forth sampling	Fifth sampling	Sixth sampling
pH	7.9	7.9	7.7	7.5	8.8	7.3
DO	18.6	10.4	7.9	8.4	9.2	11.0
Salinity	0.11	0.06	0.05	0.05	0.08	0.08
BOD	0.4	0.5	0.7	0.2	1.3	1.8
COD	0.8	3.4	1.6	1.8	2.0	3.2
SS	1.4	3.7	0.2	13.9	0.9	4.6
T-N	1,519	1,862	2,327	2,260	2,857	2,129
T-P	0.104	0.063	0.074	0.065	0.084	0.092
NH ₃ -N	0.083	0.070	ND	0.068	0.258	0.212
Cd	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Pb	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Hg	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Cu	0.009	ND	ND	ND	0.003	0.001
Zn	ND	ND	0.005	ND	ND	ND
As	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Cr	ND	ND	ND	ND	ND	ND

Table 4. Acute *Daphnia magna* toxicity test of Daecheon Stream

		First sampling	Second sampling	Third sampling	Forth sampling	Fifth sampling	Sixth sampling
EC ₅₀ (%)	24h	>100	>100	>100	>100	>100	>100
	48h	>100	>100	>100	>100	>100	>100
TU	24h	0	0	0	0	0	0
	48h	0	0	0	0	0	0

대천천의 물벼룩 급성독성시험을 수행한 결과 Table 4와 같이 6차례 모두 독성이 검출되지 않았다. 물벼룩 독성 시험 전 SS는 여과하므로 영향을 미치지 않았고, 일반항목의 경우 전체적으로 농도가 극히 낮아 물벼룩에 독성을 미칠만한 농도를 나타내지 않았고, 오히려 물벼룩 성장에 적당히 작용함으로써 대조군보다 더 활발한 움직임과 성장을 보이는 것으로 관찰되었다. Cu, Zn을 제외한 중금속 대부분 불검출이었으며 검출된 Cu(0.009 mg/L), Zn(0.005

mg/L) 항목도 물벼룩에 독성을 미치는 농도 이하로 나타나 중금속으로 인한 독성 또한 없음을 알 수 있었다.

온천천의 물벼룩 독성결과

온천천은 자연형 하천복원사업으로 수질이 점차 개선되고 있는 하천으로 단, 하류의 경우 초기 강우시 사적천, 거제천 등 지천에서 월류되는 오수로 인해 오염도가 급격하게 증가되는 지점이다. 따라서 평상시와 초기강우시 물벼

록 독성을 비교 관찰하기 위하여 5차·6차 시기에는 초기 강우시 지천이 월류된 직후 온천천 시료를 채취하였다. Fig. 3에 나타난 강우량은 1차~4차시기는 채취일 이전 6일간 누적강우량을 나타낸 것이고, 5차~6차시기는 채취일 강우량을 나타낸 것이다.

일반항목의 경우 Fig. 3을 보면 1차~4차시기는 BOD 1.9~3.3 mg/L, T-N 2.149~2.488 mg/L 등으로 강우에 따른 큰 수질 변화 없이 하천 생활환경기준 I~Ⅲ등급으로 양호하였으나, 초기 강우시인 5차~6차시기는 BOD

39.3~83.0 mg/L, T-N 16.512~20.250 mg/L 등으로 오염도가 큰 폭으로 상승하여 하천 생활환경기준 VI등급으로 조사되었다. 온천천의 경우 초기 강우시에 오염도가 크게 상승하였으나 오염물이 휩쓸려 내려간 후에는 큰 수질 변동 없이 양호한 상태를 유지하였다.

중금속의 경우 Table 5와 같이 Cu(0.009~0.012 mg/L), Zn(0.017 mg/L)이 조금 검출되었을 뿐 다른 중금속은 불검출로 나타났다.

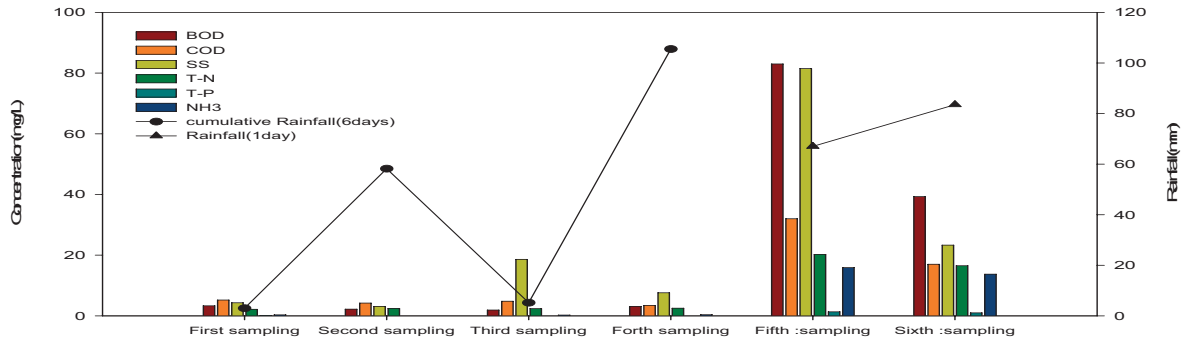


Fig. 3. Water quality of Oncheon Stream

Table 5. Water quality of Oncheon Stream

	First sampling	Second sampling	Third sampling	Forth sampling	Fifth sampling	Sixth sampling
pH	8.1	7.5	7.8	7.9	7.5	7.4
DO	10.2	5.5	7.2	7.5	3.3	6.0
Salinity	0.19	0.11	0.07	0.09	0.39	0.08
BOD	3.3	2.2	1.9	3.1	83.0	39.3
COD	5.2	4.2	4.8	3.4	32.0	17.0
SS	4.3	3.1	18.6	7.6	81.5	23.3
T-N	2.149	2.424	2.402	2.488	20.250	16.512
T-P	0.147	0.120	0.108	0.085	1.335	0.969
NH ₃ -N	0.341	0.355	0.253	0.380	15.900	13.700
Cd	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Pb	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Hg	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Cu	0.010	0.009	ND	ND	0.012	0.012
Zn	ND	ND	ND	ND	ND	0.017
As	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Cr	ND	ND	ND	ND	ND	ND

Table 6. Acute *Daphnia magna* toxicity test of Oncheon Stream

	First sampling	Second sampling	Third sampling	Forth sampling	Fifth sampling	Sixth sampling
EC ₅₀ (%)	24h	>100	>100	>100	>100	26.29
	48h	>100	>100	>100	>100	13.25
TU	24h	0	0	0	3.80	2.06
	48h	0	0	0	7.55	5.01

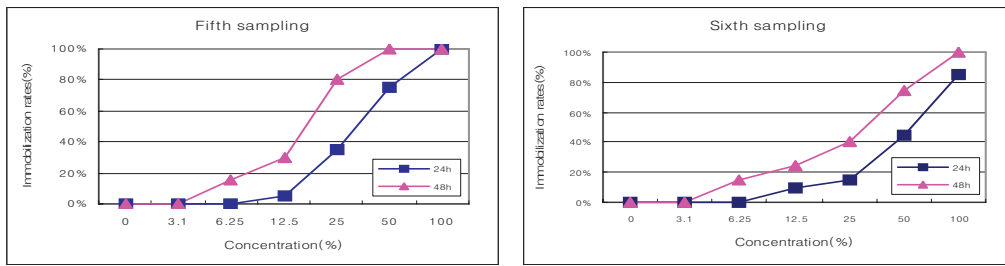


Fig. 4. The concentration-response curve of *Daphnia magna* toxicity test on Oncheon Stream

온천천의 물벼룩 급성독성은 Table 6과 같이 초기 강우 시인 5차~6차시기에만 48h EC₅₀이 각각 13.25%, 19.95%로 독성이 나타났다. Fig. 4는 온천천의 물벼룩 급성독성평가에서 얻은 농도-반응곡선(concentration-response curve)으로 독성이 유발된 5차, 6차시기의 결과이다.

초기 강우시에만 독성이 유발되는 것으로 보아 온천천의 자체의 독성이라기보다는 지류인 사직천, 거체천에서 월류되는 오수 내 독성유발 원인이 있다고 판단된다. 그중 암모니아로 인한 독성여부를 살펴보면 독성이 없는 이온성 암모니아(NH₄⁺)와 독성을 가진 비이온성 암모니아(NH₃)로 구분되는데, 비이온성 암모니아의 양이 차지하는 비율은 pH, 온도 등에 따라 달라진다⁸⁾. 비이온성 암모니아로 환산하면 5차6차 시기 때 각각 0.197 mg/L, 0.135 mg/L로 문헌(Margaret W, et. al., 1995)⁹⁾에 따르면 비이온성 암모니아의 물벼룩 48h LC50이 1.5 mg/L로 독성을 일으키기에는 낮은 농도로 조사되어 암모니아의 영향은 아닌 것으로 판단된다. 또한 중금속 항목의 경우도 Cu(0.009~0.012 mg/L), Zn(0.017 mg/L)이 물벼룩에 독성을 일으킬만한 수준 이하로 나타나 중금속 영향 또한 아닌 것으로 판단된다. 따라서 온천천의 경우 초기 강우시 사직천, 거체천에서 월류된 오수 내 미측정된 오염물질 중 독성물질이 포함되어 있었거나 혹은 오염물질이 상호작용을 통해 상승적, 상승적 작용 등을 거쳐 독성을 유발한 것으로 사료된다.

동천의 경우 해수의 영향을 받는 감소하천으로 일반항목 수질결과는 BOD 3.4~30.2 mg/L, COD 4.2~20.4 mg/L 등으로 5차시기 때 오염도가 다소 높았으며 이외에는 비슷한 오염도를 나타내었다(Fig. 5). 중금속의 경우 Table 7과 같이 Cu, Zn이 조금 검출되었을 뿐 다른 중금속은 모두 불검출로 나타났다.

동천의 물벼룩 급성독성시험결과 Table 8과 같이 1차~4차 시기에는 48h EC₅₀이 70.70%로 독성이 나타났으며 이외에는 독성이 나타나지 않았다. 동천의 경우 유기물질의 농도도 물벼룩에 영향을 미치기에는 낮았고, DO의 경우 독성 시험 전 폭기하여 그로 인한 영향은 배제되었으며, 암모니아의 경우 독성을 일으키는 비이온성 암모니아로 환산^{8,9)}하면 각각 0.034, 0.007, 0.015, 0.033, 0.224, 0.047 mg/L로 독성을 일으킬만한 농도 이하로 나타났다. 염분은 물벼룩의 출산 및 생존에 영향을 미치는 항목으로 문헌에 따르면 물벼룩에게 영향을 주지 않는 농도는 4‰이하이며(Schuyterma et al., 1997)¹⁰⁾, *Daphnia magna*가 최대 7.6‰까지 견디는 것(Fernando, 2006)¹¹⁾으로 나와있다. 이번 조사시 1차4차 시기 때는 염분이 각각 8.72‰, 13.9‰로 물벼룩에 독성 영향을 미쳤으며, 이외에는 염분이 1.09‰~4.34‰로 물벼룩에 영향을 전혀 미치지 않아 Fernando 등의 결과와 일치함을 알 수 있었다. 중금속의 경우 Cu가 0.015~0.126mg/L로 문헌에 따르면 Cu의 48h EC₅₀값이 최저 0.021~최대 0.146mg/L^{12,13,14,15)}로 충분히 독성을 일으킬 가능성이 있다고 판단된다. 따라서 동천의 경우 염분과 Cu가 물벼룩 독성에 영향을 미쳤다고 판단된다.

동천의 물벼룩 독성결과

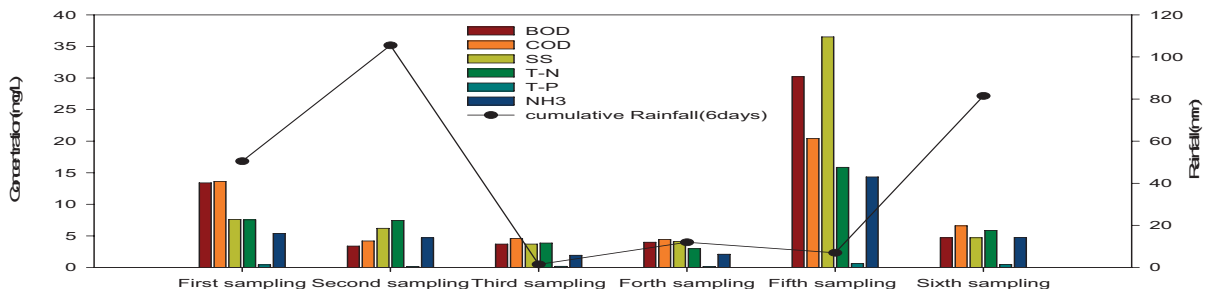


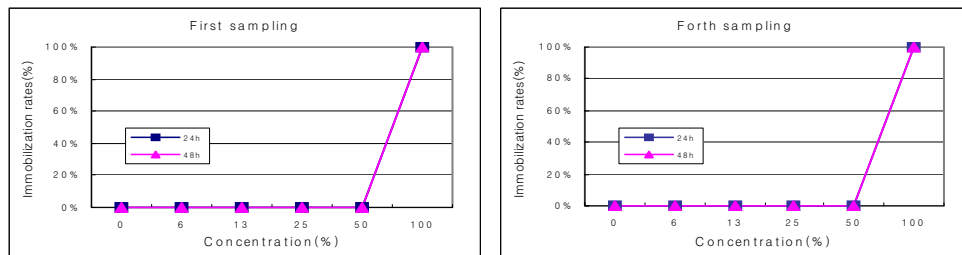
Fig. 5. Water quality of Dong Stream.

Table 7. Water quality of Dong Stream

	First sampling	Second sampling	Third sampling	Forth sampling	Fifth sampling	Sixth sampling
pH	7.2	7.2	7.3	7.6	7.6	7.4
DO	2.9	3.9	4.8	3.6	4.2	5.8
Salinity	8.72	1.09	2.89	13.90	4.34	1.81
BOD	13.4	3.4	3.7	4.0	30.2	4.7
COD	13.6	4.2	4.6	4.4	20.4	6.6
SS	7.6	6.2	3.7	4.1	36.5	4.7
T-N	7.557	7.446	3.867	2.965	15.858	5.847
T-P	0.435	0.179	0.182	0.138	0.621	0.498
NH ₃ -N	5.380	4.708	1.930	2.100	14.340	4.755
Cd	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Pb	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Hg	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Cu	0.126	0.023	0.031	0.064	0.015	0.036
Zn	0.005	0.007	ND	ND	0.008	0.014
As	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Cr	ND	ND	ND	ND	ND	ND

Table 8. Acute *Daphnia magna* toxicity test of Dong Stream

		First sampling	Second sampling	Third sampling	Forth sampling	Fifth sampling	Sixth sampling
EC ₅₀ (%)	24h	70.70	>100	>100	70.70	>100	>100
	48h	70.70	>100	>100	70.70	>100	>100
TU	24h	1.41	0	0	1.41	0	0
	48h	1.41	0	0	1.41	0	0

Fig. 6. The concentration-response curve of *Daphnia magna* toxicity test on Dong Stream

물벼룩 급성독성평가에서 얻은 농도-반응곡선의 결과인 Fig. 6을 보면 농도-반응곡선 모양이 다른 하천과 달리 24h, 48h 유영저해율이 동일하였으며 또한 동천 100%에서만 유영저해율이 100% 나타났고, 동천 50%에서는 유영저해율이 0%로 나타났는데 이는 염분과 구리가 희석되면서 더 이상 독성을 나타내지 않았으며 또한 그 외 독성 유발물질 및 오염물질간의 복합작용이 없었던 것으로 판단된다.

일광광산 배수 유입하천의 물벼룩 독성결과

일광광산 배수 유입하천의 일반항목 수질결과는 BOD 0.3~1.6 mg/L, COD 0.2~4.6 mg/L, T-N 1.600~3.197 mg/L 등으로 전체적으로 낮게 조사되었다. 중금속의 경우 Fig. 7을 보면 Cd, Cu, Zn이 높은 농도로 검출되었으며, 특히 1차 시기에 중금속의 농도가 전체적으로 다소 높았으며 As, Cr도 소량 검출되었다. 일광광산 배수 유입하천의 수질은 유기물 농도는 극히 낮으나 중금속의 농도가 비교적 높게 검출되었으며 특히 일광광산은 구리를 채굴하다 1986년 폐광된 광산으로 구리와 아연의 농도가 높게 나타났다.

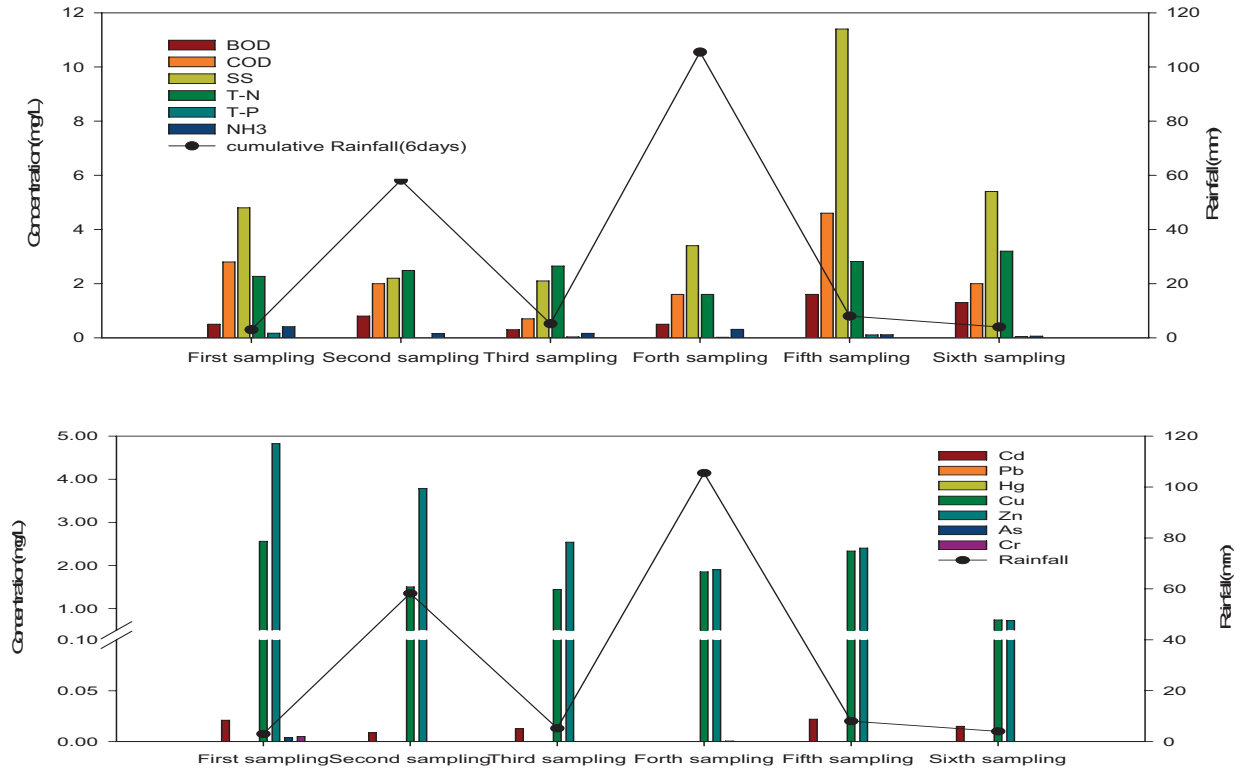


Fig. 7. Water quality of stream inflowed from Ilgwang mine.

Table 9. Water quality of stream inflowed from Ilgwang mine

	First sampling	Second sampling	Third sampling	Forth sampling	Fifth sampling	Sixth sampling
pH	4.2	4.2	3.8	4.8	3.5	4.0
DO	9.2	9.2	8.0	10.0	8.5	11.2
Salinity	0.61	0.19	0.21	0.15	0.23	0.22
BOD	0.5	0.8	0.3	0.5	1.6	1.3
COD	2.8	2.0	0.2	1.6	4.6	2.0
SS	4.8	2.2	2.1	3.4	11.4	5.4
T-N	2,268	2,486	2,647	1,600	2,815	3,197
T-P	0.170	0.014	0.034	0.021	0.105	0.046
NH ₃ -N	0.410	0.157	0.162	0.310	0.114	0.059
Cd	0.021	0.009	0.013	ND	0.022	0.015
Pb	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Hg	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Cu	2.562	1.502	1.445	1.853	2.335	0.737
Zn	4.825	3.787	2.540	1.902	2.405	0.721
As	0.004	ND	ND	ND	ND	ND
Cr	0,005	ND	ND	ND	ND	ND

일광광산 배수 유입하천의 경우 6차례 모두 물벼룩 독성이 나타났으며, 특히 1차 시기에 32.79 TU로 독성이 가장 높은 것으로 나타났다(Table 10). 일광광산 배수 유입하천의 경우 물벼룩이 생존하기 어려운 낮은 pH와 높은

중금속으로 인해 독성이 나타난 것으로 판단되었는데 문헌에 따르면 일반적으로 *Daphnia magna*는 pH 5에서 24시간 내에 10%가 죽으며 pH 4.2에서는 60% 이상이 사멸한다¹⁶⁾. 먼저 생물독성에 영향을 미치는 pH의 영향을 배

제하기 위하여 pH를 7.0 ± 0.2 조정한 후에 독성시험을 실시한 결과 Fig. 8과 같이 독성이 다소 감소하기는 하였으나 여전히 높은 독성도를 나타내었다. 이는 pH 외에 물벼룩 급성독성을 유발하기에 충분한 농도의 Cu(0.737~

2.562 mg/L), Zn(0.721~4.825 mg/L)의 복합작용으로 독성이 나타난 것으로 판단된다. Fig. 9는 일광광산 배수 유입하천의 물벼룩 급성독성평가에서 얻은 농도-반응곡선 (concentration-response curve)의 결과이다.

Table 10. Acute *Daphnia magna* toxicity test of stream inflow from Ilgwang mine

		First sampling	Second sampling	Third sampling	Forth sampling	Fifth sampling	Sixth sampling
EC ₅₀	24h	5.90	7.92	10.08	9.86	8.50	18.80
	48h	3.05	5.20	5.88	4.51	3.17	9.28
TU	24h	16.95	12.62	9.92	10.14	11.76	5.32
	48h	32.79	19.23	17.00	22.17	31.55	10.78

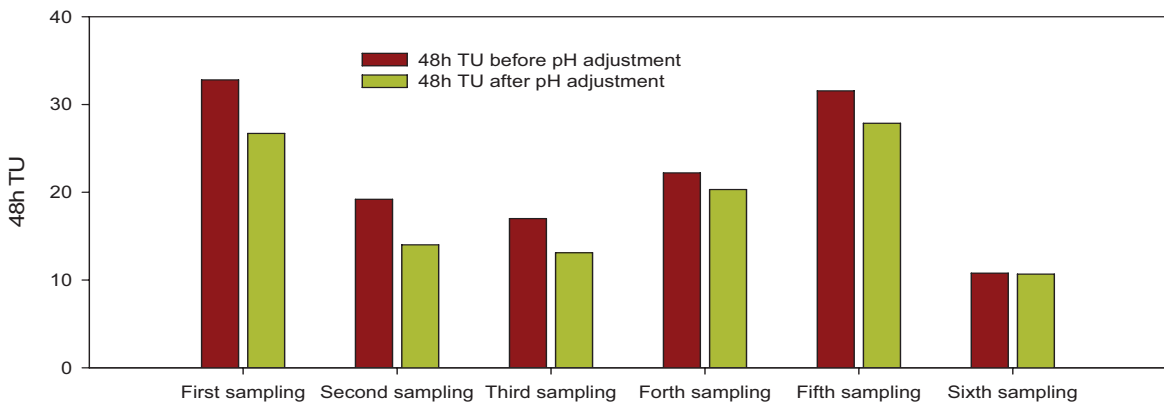


Fig. 8. Toxicity change of stream inflow from Ilgwang mine after pH adjustment.

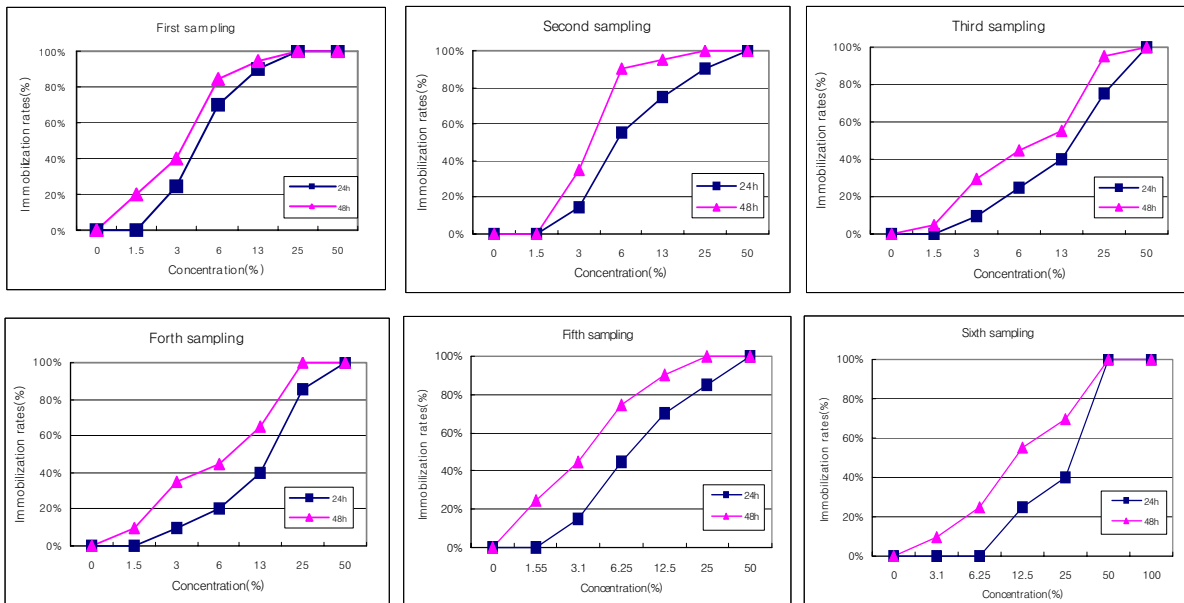


Fig. 9. The concentration-response curve of *Daphnia magna* toxicity test on stream inflow from Ilgwang mine.

감전수로의 물벼룩 독성결과

감전수로의 일반항목 수질결과는 BOD 13.3~1419.5 mg/L, COD 36.0~780.0 mg/L, SS 17.8~166.7 mg/L 등으로 수질의 변화가 매우 컸는데, 1차~6차 시기에는 적은 강우량으로 인해 오염물질이 농축되어 오염도가 높게 나타났으며, 4차 시기에는 많은 강우량으로 인해 희석되어 오염도가 전체적으로 낮게 나타났다(Fig. 10).

중금속의 경우 Hg를 제외하고는 대부분의 중금속이 검출되었는데 특히 Cu, Zn, Cr의 농도가 높았으며, 일반항목과 마찬가지로 1차~6차 시기에 중금속 오염도가 전체적으로 높게 나타났다. 감전수로의 경우 강우 외에는 자연수의 유입이 전혀 없는 곳으로 강우에 따른 수질 변동이 매우 큼을 알 수 있었다.

감전수로는 조사하천 중 오염부하량이 가장 높은 지점으로 물벼룩 독성 또한 가장 높게 나타났으며, 독성값은 Table 12와 같이 건천시인 1차~6차시기 때 각각

54.64TU, 86.21 TU로 독성이 가장 높게 나타났다. Fig. 12는 감전수로의 물벼룩 급성독성평가에서 얻은 농도-반응곡선(concentration-response curve)의 결과이다.

감전수로의 경우 낮은 pH, 높은 유기물 및 중금속 농도 등 생물독성에 미치는 요소가 복합적으로 존재하였다. pH의 영향을 제거하기 위해서 pH 적정 범위내에 든 4차~5차 시기를 제외하고 그 외 pH를 벗어난 4차례 pH를 7.0 ± 0.2 로 보정하고 독성시험을 실시한 결과 Fig. 11과 같이 여전히 높은 독성도를 보였다. 중금속 중 Cu(0.143~4.987 mg/L), Zn(1.939~49.800 mg/L), Cr(0.100~14.821 mg/L)의 농도가 독성을 일으키기에 충분한 농도로 물벼룩 독성에 가장 큰 영향을 끼친 것으로 판단되며, 또한 감전수로의 경우 중금속의 농도뿐만 아니라 유기물의 농도 또한 매우 높아 이들이 복합적으로 작용했을 것으로 사료된다.

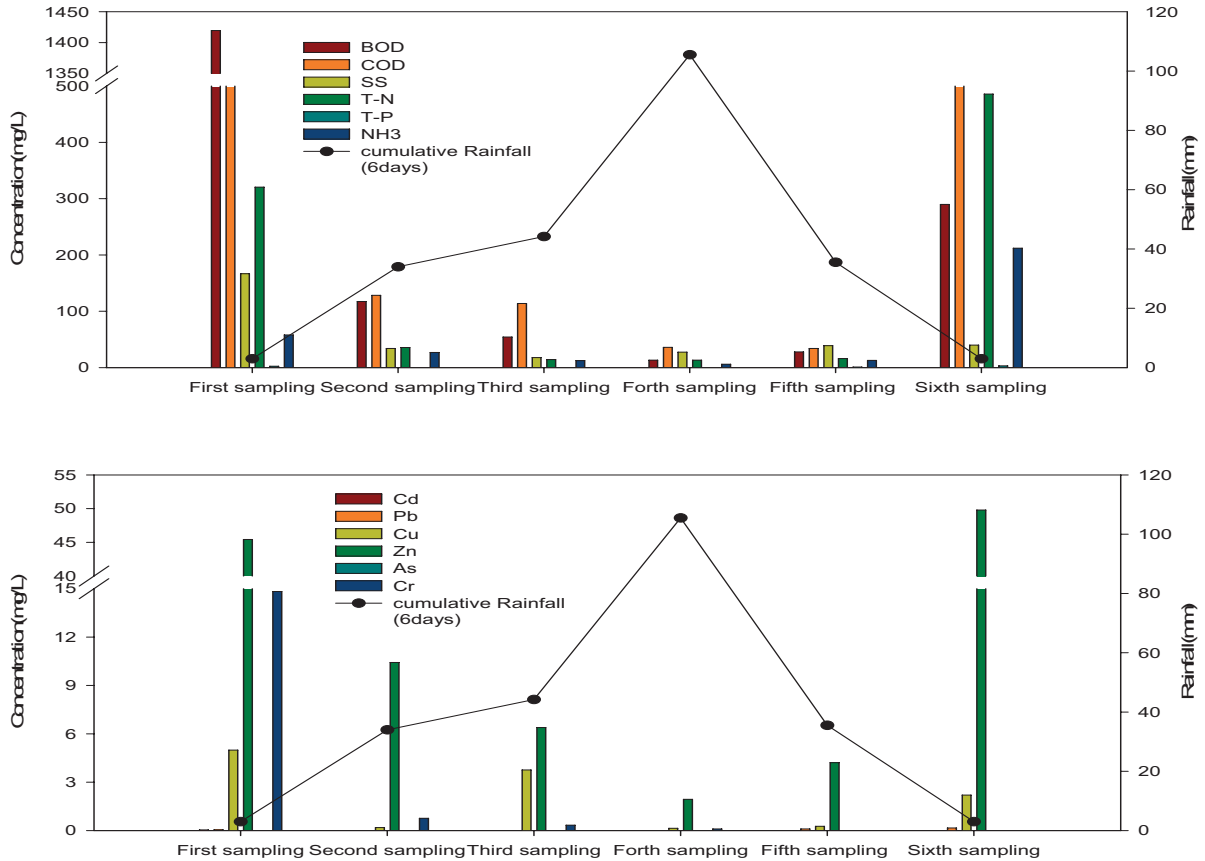


Fig. 10. Water quality of Gamjeon Watercourse.

Table 11. Water quality of Gamjeon Watercourse

	First sampling	Second sampling	Third sampling	Forth sampling	Fifth sampling	Sixth sampling
pH	3.8	4.8	4.4	6.8	7.2	3.9
DO	6.2	3.5	4.8	0.9	0.6	1.5
Salinity	4.03	0.81	1.06	0.34	0.31	5.36
BOD	1419.5	117.5	54.3	13.3	27.8	289.9
COD	780.0	128.4	113.9	36.0	34.0	780.0
SS	166.7	34.0	17.8	27.5	39.0	40.0
T-N	320.500	35.630	14.230	13.300	16.180	485.600
T-P	2.400	0.105	0.080	0.163	1.030	3.100
NH ₃ -N	58.100	27.000	12.300	6.000	12.925	212.130
Cd	0.040	ND	ND	ND	0.003	ND
Pb	0.050	ND	ND	ND	0.10	0.16
Hg	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Cu	4.987	0.181	3.758	0.143	0.265	2.202
Zn	45.420	10.424	6.392	1.939	4.210	49.800
As	ND	ND	ND	0.029	0.008	0.009
Cr	14.821	0.762	0.331	0.100	ND	ND

Table 12. Acute *Daphnia magna* toxicity test of Gamjeon Watercourse

		First sampling	Second sampling	Third sampling	Forth sampling	Fifth sampling	Sixth sampling
EC ₅₀ (%)	24h	3.39	11.15	5.97	19.74	52.34	3.51
	48h	1.83	7.24	3.13	14.35	26.03	1.16
TU	24h	29.50	8.97	16.75	5.07	1.91	28.49
	48h	54.64	13.81	31.95	6.97	3.84	86.21

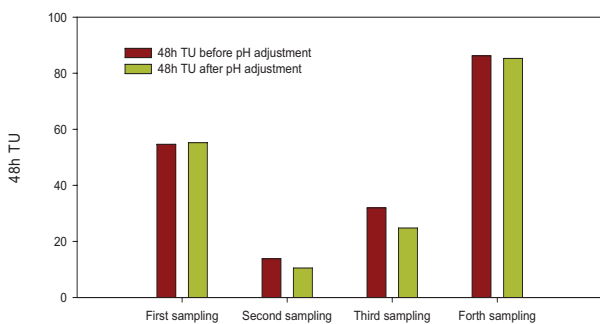


Fig. 11. Toxicity change of Gamjeon Watercourse after pH adjustment.

생물독성시험 결과 및 이화학적항목간의 상관관계

Table 13은 물벼룩 급성독성값과 이화학적항목간의 상관분석을 실시한 결과로, 온천천의 경우 오염물질이 거의

일반항목에 국한되며 중금속 항목의 경우 대부분 불검출로서 특히 T-N($r=0.816$), NH₃($r=0.843$)와 유의수준 0.05이하에서 48시간 TU 값과 높은 양의 상관관계를 보였다. 동천의 경우 대부분의 이화학적항목과 물벼룩 독성과는 상관성이 없는 것으로 조사되었으나, 그 중 염분($r=0.917$)은 유의수준 0.0101에서 양의 상관관계가 나타나 동천의 물벼룩 독성에 상관성이 있음을 알 수 있었다. 일광광산 배수 유입하천의 경우 광산에서 배수되는 갭내수로 인해 유기물질보다는 중금속과 상관관계가 높았는데 특히 Cu($r=0.982$)는 유의수준 0.01이하에서 높은 양의 상관관계를 보였다. 감전수로의 경우 유기물질과 중금속의 오염도가 높은 곳으로 각종 오염물질이 혼재되어 있어 상호작용에 의해 독성이 증가되거나 상쇄될 수 있어 독성원인을 파악하기 어려우나, 상관분석 결과 48시간 TU값과 염분($r=0.974$), T-N($r=0.949$), Zn($r=0.927$), COD($r=0.920$) 순으로 상관관계가 높은 것으로 나타났으며 모두 유의수준 0.01이하에서 양의 상관관계를 보였다.

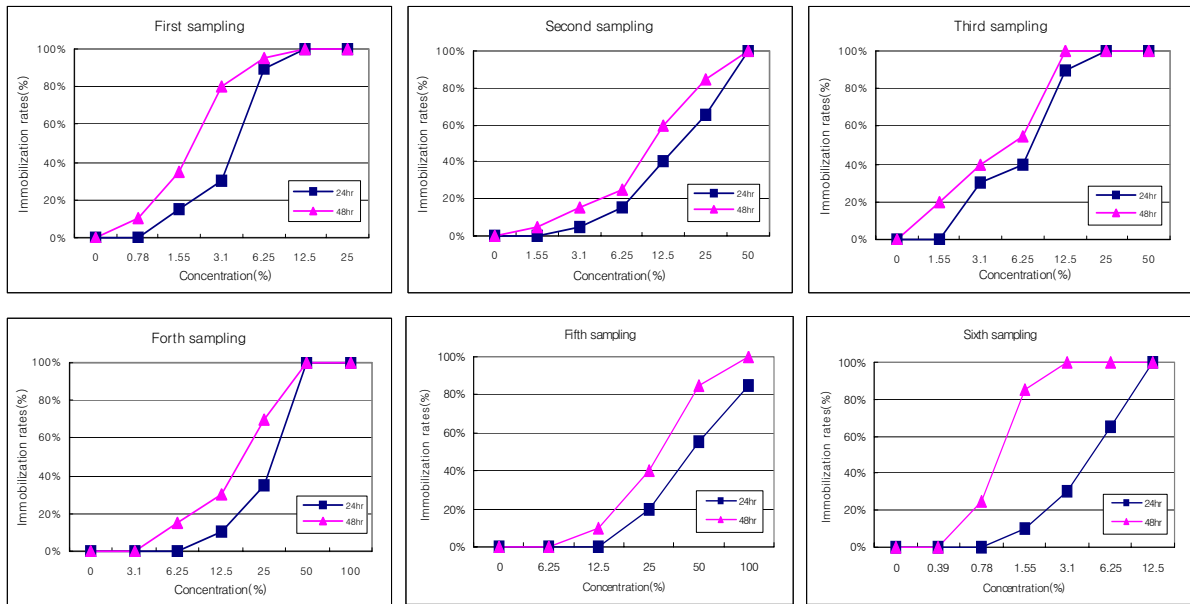


Fig. 12. The concentration-response curve of *Daphnia magna* toxicity test on Gamjeon Watercourse.

Table 13. Statistical correlation analysis between 48h TU and physicochemical properties

		pH	Salinity	BOD	COD	T-N	T-P	NH ₃ -N
Oncheon Stream	r	-0,677	0,084	0,619	0,618	0,816*	0,772	0,843*
Dong Stream	r	0,070	0,917*	-0,087	0,004	-0,336	-0,213	-0,306
Ilgwang mine	r	-0,121	0,613	0,076	0,712	-0,334	0,793	0,590
Gamjeon Watercourse	r	-0,799	0,974**	0,485	0,920**	0,949**	0,858	0,900*
Total	r	-0,755**	0,076	0,545	0,834**	0,847**	0,681	0,801**
		Cd	Pb	Cu	Zn	As	Cr	
Oncheon Stream	r	-0,281	(a)	0,578	0,963	0,386	0,122	
Dong Stream	r	(a)	(a)	0,839	-0,142	(a)	(a)	
Ilgwang mine	r	0,471	(a)	0,982**	0,637	0,623	0,614	
Gamjeon Watercourse	r	0,301	0,626	0,616	0,927**	-0,278	0,317	
Total	r	0,483	0,669	0,791**	0,880**	0,029	0,412	

* : Correlation is significant at the 0,05 level (2-tailed)

** : Correlation is significant at the 0,01 level (2-tailed)

(a) : Cannot be computed because at least one of the variables is constant

결 론

본 연구에서는 부산시 하천 및 수로에 대한 독성수준을 평가하기 위해 혼합물의 독성상호작용을 인지하는데 효과가 뛰어난 물벼룩(*Daphnia magna*)을 이용하여 독성시험을 실시하였으며 또한 물벼룩 독성값과 이화학적항목간의 상관분석을 통해 독성에 미치는 요인을 분석하고 포괄적인 하천 상태를 파악하고자 하였다.

1. 대천천은 부산시 하천 중 양호한 수질을 유지하는 하천으로 하천 수질 I 등급을 모두 만족하였으며 물벼룩 독성 또한 전혀 관찰되지 않아 위해성이 없는 건강한 하천임을 알 수 있었다.
2. 온천천의 경우 비강우시에는 I 등급~III등급으로 비교적 수질이 양호하였으나, 초기 강우시에는 거제천, 사직천에서 월류되는 오수로 인해 하천 VI등급으로 수질의 변동이 매우 컸다. 물벼룩 독성 또한 비강우시에는 독성이 없었으나 초기 강우시에는 측정된 항목이 독성을 유발하기에 농도가 낮았음에도 불구하고 독성(6.28 TU)이 나타났는데, 이는 미측정된 오염물질 중 독성유발물질이 있었거나 혹은 각각의 오염물질이 상호작용을 통해 독성을 유발한 것으로 판단된다. 온천천의 경우 분류식 하수관거 설치로 강우시 월류되는 지천을 차단한다면 위해성이 없는 안정적인 하천이 될 것으로 사료된다.
3. 동천은 낮은 DO로 인해 IV~VI등급으로 조사되었으나, DO농도는 독성시험 전 폭기하여 그 영향이 배제되었으며, 유기물질도 대체로 낮아 영향을 미치지 않았으나, 염분과 Cu가 물벼룩에 영향을 미칠 정도로 검출되어 이로 인해 독성이 나타난 것으로 판단된다. 평균 독성값은 0.47 TU로 동천과 같은 감조하천의 경우 시험 생물종을 높은 염분에서도 생존 가능한 종으로 독성시험을 실시하여야 신뢰성을 높일 수 있을 것으로 보인다.
4. 일광광산 배수 유입하천의 경우 광산에서 배수되는 갯내수로 인해 유기물질은 낮고 중금속이 비교적 높게 나타났으며, 특히 Cu를 채굴하던 폐광산으로 Cu농도가 매우 높았다. 물벼룩 평균 독성값이 22.25 TU로 독성이 높은 편이었는데 이는 물벼룩이 생존하기 어려운 낮은 pH와 높은 Cu농도가 큰 영향을 미쳤다고 판단되며 상관관계에서도 Cu($r=0.982$)가 유의수준 0.01이하에서 높은 양의 상관성을 보였다. 일광광산 배수 유입하천의 경우 광산 내 갯내수를 이온교환이나 투수성반응벽체 등을 이용¹⁷⁾하여 중금속 제거 후 배수한다면 독성이 감소할 것으로 사료된다.
5. 감전수로의 경우 유기물질 및 중금속 등 오염부하량이

가장 높은 곳으로 독성값도 32.90 TU로 가장 높게 나타났다. 감전수로는 각종 오염물질이 혼재되어 있어 이들의 상호작용을 통해 복합적으로 물벼룩 독성에 영향을 미쳤다고 판단되며, 그 중 Cu, Zn, Cr의 농도가 독성을 일으키기에 충분한 농도로 검출되었고 상관분석 결과는 Zn($r=0.927$)과의 상관관계가 가장 높은 것으로 나타났다. 감전수로는 강우 외에는 자연수 유입이 없는 곳으로 주변 공장에서 배출되는 산업폐수의 유입을 차단하여 오염부하량을 줄인다면 독성이 감소할 것으로 판단된다.

6. 물벼룩 독성은 대천천(0 TU), 온천천(0 TU), 동천(0.47 TU), 초기강우시 온천천(6.28 TU), 일광광산(22.25 TU), 감전수로(32.90 TU) 순으로 일반적인 각 하천의 수질오염도와 비교적 유사한 경향을 보였다.

참고문헌

1. 이성규 등, "어류, *Daphnia* 및 조류와 Ames test를 이용한 산업폐수의 환경독성 및 유전 독성 평가", 한국수질보존학회지, 7, pp.100~109 (1991).
2. 류성민, "환경시료의 생태독성 평가를 위한 Microtox-물벼룩 Tandem Bioassay", 인제대학교 대학원 석사학위논문, (2002).
3. Wong, P. T. S., Dixon, D. G., "Bioassessment of Water Quality", *Envo. Toxicity & Water Quality*, 10, pp.9~17 (1995).
4. Leal, H. E., et al, "Acute Toxicity of Hatdboard Mill Effluents to Different Bioindicators", *Envo. Toxicity & Water Quality*, 12(1), pp.39~42 (1997).
5. 김병석, "한국 담수산 물벼룩류를 이용한 농약의 생태독성시험법 개발", 서울대학교 대학원 석사학위논문, (2000).
6. EPA, "Short-term methods for estimating the chronic toxicity of effluents and receiving waters to freshwater organisms" (Third edition), EPA-600/4-91/002, (1994).
7. 김상훈, "물벼룩과 발광박테리아를 이용한 산업폐수의 생물독성평가에 관한 연구", 한양대학교 대학원 박사학위논문, (2006).
8. Lagerspetz, K., "Physiological studies on the brackish water tolerance of some species of *Daphnia*", *Arch Soc. Vanarno Suppl.*, 9, pp.138~143 (1995).
9. Margaret W. Toussaint, Tommy R. Shedd, William

- H. van der Schalie, "A comparison of standard acute toxicity tests with rapid-screening toxicity tests", *Environmental toxicology and chemistry*, 14(5), pp.907~915 (1995).
10. Schuytema, G. S., Nebeker, A. V., Stutzman, T. W., "Salinity tolerance of *Daphnia magna* and potential use for estuarine sediment toxicity tests", *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, 33, pp.194~198 (1997).
 11. Fernando, M. J., Laura, M. J., "Chronic effect of NaCl salinity on a freshwater strain of Straus (Crustacea: Cladocera): Ademographic study", *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 67, pp.411~446 (2006).
 12. Guilhermino, L., Diamantino, T. C., Ribeiro, R., Goncalves, F., Soares, A. M. V. M., "Suitability of test media containing EDTA for the evaluation of acute metal toxicity to *Daphnia magna* Straus", *Ecotox. Environ. Safe.*, 38, pp.292~295 (1997).
 13. 정재원 등, 물벼룩에 대한 중금속의 급성 및 만성독성, *한국환경과학회지*, 10(4), pp.293~298 (2001).
 14. Mount, D. I., Norberg, T. J., "A seven-day life cycle cladoceran toxicity test", *Environmental toxicology and chemistry*, 3(3), pp.425~434 (1984).
 15. Khangarot, B. S., Ray, P. K., "Correlation between heavy metal acute toxicity values in *Daphnia magna* and Fish", *Environ. Contam. & Toxicol.*, 38, pp.722~726 (1987).
 16. Lenhart, B., Steinberg, C., "Limnochemische und Limnobiologische Auswirkungen der Versauerung von kalkarmen Oberflaechenwaessern", Bayerische Landesamt fuer Wasserwirtschaft, (1984).
 17. 이현준 등, "폐광산 배수와 퇴적물의 중금속 오염과 생물독성 평가", *한국물환경학회지*, 23(2), pp.287~293 (2007).