

관내 하천에 대한 생태학적 독성평가

Ecotoxicity Evaluation of Natural-type Urban Stream in Incheon

노재일, 곽완순, 이병옥, 민성은, 정유진, 조영민
인천보건환경연구원 산업폐수과

Jae Il Ro, Wan Sun Kawak, Byung Ok Lee, Seong Eun Min,
Yu Jin Jung, Young Min Cho

Division of Industrial Wastewater, Incheon Institute of Public Health and Environment

- ABSTRACT -

This study was conducted to analyze ecotoxicity in Incheon targeted at the natural-type urban streams including upstream, midstream, and downstream of Najinpocheon, Gongchoncheon, Gulpocheon, Seunggicheon and Jangmansucheon. Monthly conducted study during February to November 2013 results all streams were free of toxic based on tests using *Daphnia magna* with 0.0 TU while tests using *Ulva pertusa* were reported up to 2.1 TU and more sensitive to toxic than the *Daphnia magna*. Toxicity found eight times out of 60 runs using Ecotoxicity test with *Ulva pertusa* suggests heavy metals in the streams need to be monitored periodically. In addition, they were free of heavy metals of Cr, Hg, Cd and Pb but heavy metal amounts of Mn, Fe, Cu, Zn and As were measured very insignificant and this results they meet the water quality standard for river.

Key Words : Nature-type stream, TU, *Daphnia magna*, *Ulva pertusa*, heavy metal

I. 서론

하천에 대한 시각은 용수공급과 홍수방재에서 인간과 자연이 더불어 살아가는 휴식공간으로 변화하고 있다. 하천환경과 생태계를 건전하게 유지하기 위해서는 양호한 수질과 풍부한 수량의 확보가 반드시 필요한데, 인천광역시의 하천들은 규모가 작은 하천들로 한강 하구나 서해로 유입되며, 공업단지, 주거단지, 농경지를 통과하는 동안 산업폐수, 생활오수, 농업용수 등의 유입으로 오염되고 변형되어 왔다. 최근에는 하천을 주거공간의 일부로 인식하고, 하천 고수부지를 이용한 친수공간의 제공 및 시민들의 쉼터로 자리잡고 있다. 이에 인천광역시는 환경개선과 생태계 유지를 위해 공촌천, 승기천, 굴포천, 장만수천, 나진포천을 자연친화적 도심 하천으로 조성하였다.

그러나 하천은 점오염원 및 비점오염원에 항상 노출의 위험이 있으며, 수량의 증감에 따라 수질의 변화도 심하다. 현재 우리나라의 생태독성 평가는 500m³/day 이상의 공공하수처리장과 폐수종말 처리장, 그리고 35개 업종 사업장의 방류수 중 직접 방류되는 시설에만 법적으로 기준을 정하고 있을 뿐 이러한 개별사업장이나 공공처리시설에서 방류수가 유입되는 하천에 대한 조사가 미흡한 실정이다.

따라서 본 조사에서는 수계의 오염을 총체적으로 평가할 수 있고, 잠재적인 독성여부를 결정하는데 많은 도움을 줄 수 있는 생물검정을 이용하여 인천 관내의 자연형으로 조성된 5개 하천에 대하여 생태학적 독성 수준을 조사하고자 하였다. 또한 수질분석을 통해 하천에 영향을 주는 오염인자를

파악하여 그에 따른 최적의 관리대책을 마련함으로써 인간과 생물이 함께하는 건강한 하천에 대한 올바른 방향을 제시하고자 한다.

II. 조사내용 및 방법

2.1 조사대상

조사범위는 인천관내의 하천 중 자연형 하천 조성사업이 적용된 나진포천, 공촌천, 굴포천, 승기천, 장만수천을 대상으로 하였으며, 대상 하천의 위치는 Fig. 1과 같다.



Fig. 1. 하천의 위치

Table 1. 하천의 현황

| 명칭 | 하천위치 | 하천연장 | 공사완료 |
|------|-----------------|---------|----------|
| 나진포천 | 서구 마전동 ~ 불로동 | 3.86 km | 2008.07월 |
| 공촌천 | 서구 공촌동 ~ 경서동 | 4.30 km | 2009.11월 |
| 굴포천 | 부평 청천동 ~ 계양 하야동 | 6.08 km | 2008.10월 |
| 승기천 | 남동 구월동 ~ 남동 유수지 | 6.20 km | 2009.07월 |
| 장만수천 | 남동 장수동 ~ 서창동 | 3.91 km | 2004.04월 |

본 조사는 2013년 2월부터 2012년 11월까지 수행하였으며, 자연형 조성이 적용된 공간에 대하여 거리별로 상류, 중류, 하류로 나누어서 조사하였다. 하천의 현황은 Table 1과 같다.

2.2 조사항목 및 방법

가. 수질 및 유해물질 분석

흡광광도법 (AA280FS-Varian)을 이용하여 중금속 항목을 분석하였고, BOD₅, COD_{Mn} 등의 일반수질항목은 수질오염공정시험방법에 의해 분석하였다. 잔류염소는 pocket colorimeter (HACH)를 이용하였으며 전기전도도, 염분 등은 다항목 수질측정기(YSI 600XL)를 이용하여 분석하였다. 조사항목 및 조사주기는 Table 2에 나타내었다.

Table 2. 조사항목 및 조사주기

| 조사항목 | 조사주기 |
|--|----------|
| 구멍갈파래를 이용한 생태독성 | 분기별 1회 |
| <i>Daphnia Magna</i> 를 이용한 생태독성 | 매월 |
| DO, pH, 온도, BOD, COD, SS, T-N, T-P, 경도, 잔류염소, ABS, 전기전도도, 염소이온, 염분 | 매월(14항목) |
| 중금속(Cr, Mn, Fe, Cu, Zn, As, Hg, Cd, Pb) | 매월(9항목) |

나. 생태독성 분석

생태독성 관리제도란 살아있는 생물을 이용하여 오염을 평가하는 방법으로, 현재 우리나라는 물벼룩(*Daphnia magna*)을 이용하여 24시간 후의 영향율을 조사하여 TU (Toxic Unit)라는 단위로 독성수준을 평가한

다. 본 조사에서는 물벼룩과 ISO 인증을 받은 구멍갈파래를 이용하여 자연형으로 조성된 하천의 생태독성 여부를 조사하였다. Fig. 2에는 물벼룩(*Daphnia magna*)의 암·수 및 구멍갈파래(*Ulva pertusa*)를 나타내었다.



Fig. 2. 물벼룩의 암·수 및 구멍갈파래

Table 3. 물벼룩 및 구멍갈파래 시험조건

| 항목 | 시험조건 | |
|--------|--|--|
| 시험생물종 | 물벼룩(<i>Daphnia magna</i>) | 구멍갈파래(<i>Ulva pertusa</i>) |
| 시험기간 | 24시간(1일) | 96시간(4일) |
| 온도 | 18 ~ 22 ° C | 13~17 ° C |
| 광도 | 500~1000 lux | 4000~5000 lux |
| 광주기 | 16시간 광조건 : 8시간 암조건 | 12시간 광조건 : 12시간 암조건 |
| 시험용액부피 | 50 mL | 2.5 mL |
| 시험생물 수 | 농도 당 물벼룩 5마리씩 4반복 | 농도 당 구멍갈파래 1개씩 4반복 |
| 시험농도 | 대조구, 6.25%, 12.5%, 25%, 50%, 100% | 대조구, 6.25%, 12.5%, 25%, 50%, 100% |
| 반복수 | 같은 농도 당 4개의 반복구 | 같은 농도 당 4개의 반복구 |
| 희석수 | 배양액 (KCl, MgSO ₄ , NaHCO ₃ , CaSO ₄ ·12H ₂ O) | 조제한 인공해수(32~34‰) |
| 표준독성시험 | 다이크로프산칼륨에 대한 EC ₅₀ 범위는 0.9~2.1(mg/L) | 구리표준용액에 대한 EC ₅₀ 범위는 0.098±0.033(mg/L) |
| 측정요소 | 물벼룩 사망 및 유영저해를 | 구멍갈파래의 생식 억제 비율 측정 |
| 측정원리 | 물벼룩은 독성물질에 노출되면 유영성을 잃게 되는데, 시험생물의 50%가 유영저해를 받는 시료 농도를 측정하여 평가 | 구멍갈파래는 독성물질에 노출되면 생식을 위한 포자를 형성하지 않아 원래의 녹색을 유지하나, 독성이 없으면 생식과정에서 포자를 방출하여 흰색으로 변하는 원리 |

Table 3에는 물벼룩과 구멍갈파래의 시험 조건 및 측정원리에 대하여 요약하였다. 국제적인 시험종인 물벼룩(*Daphnia magna*)을 이용한 급성독성영향평가는 수질오염공정시험법 제 49 항 물벼룩을 이용한 급성독성시험법(ES04751.1)에 따라 채수한 물 시료에 생후 24시간 미만 된 개체를 24시간 노출시킨 후 물벼룩의 50%가 유영저해(immobilization)를 일으키는 시료농도(EC₅₀에

서의 시험수중 시료의 함유율)를 결정하고 단위환산에 의해 생태독성 값(TU)을 계산한다. (TU = 100 / EC₅₀).

또한 국제 표준중(ISO) 등록이 완료된 구멍갈파래(*Ulva pertusa*)를 시험생물로 사용하여 ISO DIS 13308로 확정된 매뉴얼에 따라 구멍갈파래를 이용하여 96시간 배양 후 대조군과 실험군 간의 포자형성 정도를 비교하는 시험법이다. 포자 형성을 저해평가

[illegible]

3.2 하천별 평균 수질 결과

각 하천별 평균 수질 결과는 Fig 3에 나타내었다. BOD, COD, 등 모든 값이 높은 편인데, 이는 하천 전체의 수질이 나쁜 것이 아니라 상류, 중류, 하류의 일부 지점에서 외부 오염원이 유입되어 평균 수질을 높이기 때문이다.

승기천의 경우 COD의 농도가 16.4 mg/L로 다른 하천보다 높으며, 나진포천이나 공촌천과 다르게 BOD/COD의 비율이 낮게 분석되어 생물학적으로 분해 가능한 유기물의 함유율이 적은 것으로 나타났다. 승기천의 수원은 만수하수처리장의 방류수가 하천유지용수로 이용되기 때문에 생분해 비율이 낮은 것이며, 만수하수처리장 방류수의 자체 COD 및 남동공단과 유수지의 영향 등이 복합적으로 작용하여 COD가 높은 것으로 판단된다.

나진포천, 공촌천 및 굴포천의 경우는 승기천이나 장만수천과는 다르게 생활오수 등의 유입으로 유기물 중 BOD의 비율이 높게 나타났으며 유입되는 지점에서 T-N 및 T-P의 농도도 상승하였다.

하천은 바닥이 모래나 자갈 기타 퇴적물로 쌓이고, 유속 감소에 따른 정체현상과 조류성장 등으로 SS가 비교적 높게 분석되었다. 특히 장만수천과 굴포천의 SS 농도가 높게 측정되었는데, 굴포천의 경우는 하류에서 하상이 넓어지고 유속 감소에 따른 정체 수역에서 조류 증가 및 외부오염원의 유입으로 SS 농도가 증가한 것으로 평가된다. 장만수천은 다른 하천과 마찬가지로 하류에서 하상이 넓어지고 유속 및 유량이 감소하며, 기수해역의 특성상 해수의 유입이 기여한 것으로 보인다.

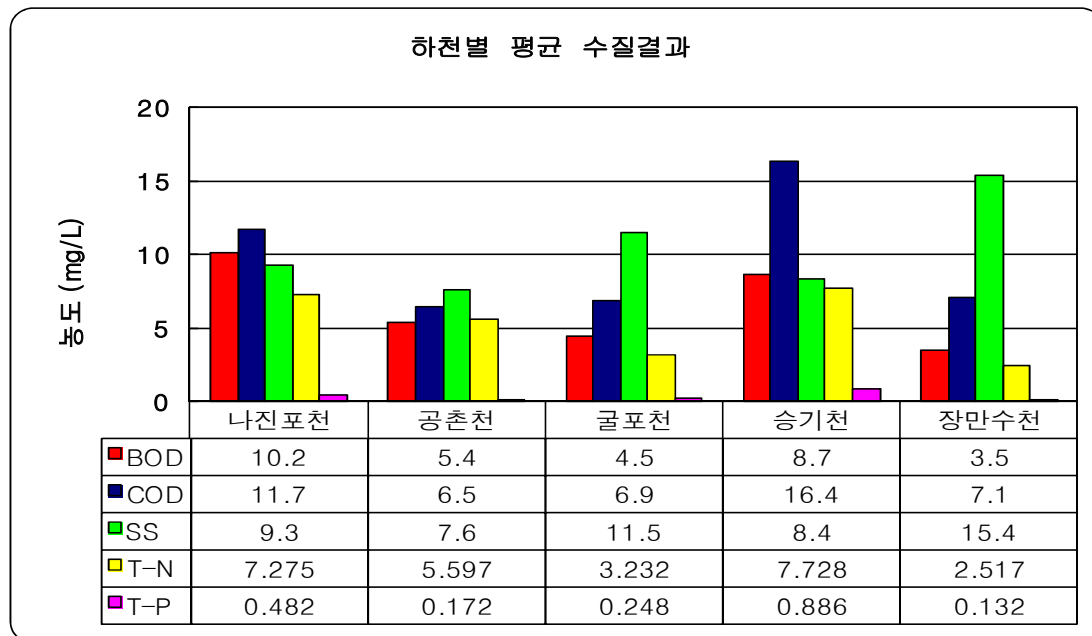


Fig. 3. 각 하천별 평균 수질 결과

3.3 각 하천 지점별 평균 BOD 결과

나진포천의 수질은 다른 하천들과는 다른 양상을 나타내고 있는데, 특히 하류보다 상류에서 오염도가 높았다. 이것은 상류시점 부에서 주거지역의 생활하수가 별도의 처리 없이 그대로 하천에 유입되어 BOD 농도가 20.6 mg/L로 매우 높게 나타났으며, 중류와 하류로 갈수록 하천의 자정작용으로 BOD 농도는 4.8 mg/L로 낮아지는 형태를 보인다. 그러나 중류부터 하류까지 현저한 개선 효과는 보이지 않아 하류로 이동하는 과정에도 오염물질의 유입이 있음을 보여준다. 따라서 유입되는 오염원에 대한 차단 대책이 필요하다.

공촌천은 공촌정수장의 물이 하천유지 용수로 공급되는데, 수량과 수질이 적정수준 이상으로 유지되고 있기 때문에 하천유지 용수로 적합하다고 볼 수 있다. 상류와 중류 지역은 농경지와 주거지역이 공존하고 있는데, 별도의 오염원이 유입되지 않아 BOD 1.0 mg/L 이하인 Ⅰa(매우 좋음)등급으로 매우 깨끗한 상태를 나타내고 있다. 그러나 하류의 BOD 농도는 평균 14.4 mg/L로 크게 증가한다. 하류 지역은 LH공사 주변으로 주거와 음식점 같은 상가 등이 있고, 서부산업단지가 인접해 있는데, 하류 주변의 공촌2교 다리 아래에서 생활오수 등이 유입되는 것이 관찰되었으며, 이것이 하천을 오염시키고 악취를 유발하며 주변 경관을 훼손하는 것으로 보인다. 또한 하류는 하상의 폭이 넓어지면서 유속도 느려지고 이로 인한 하천바닥은 오염물이 퇴적하고, 겨울철에는 유량과 유속이 적어서 얼기도 한다.

굴포천은 인천 도심을 관통하여 김포지역

을 거쳐 한강으로 유입되는 하천이다. 상류 지역은 최대한 자연에 가까운 하천으로 적용되었고, 중류지역은 청천천과 굴포천이 합류된 지점으로, 주민들이 산책할 수 있는 산책로가 만들어져 있는 생활 속의 하천으로 조성되었다. 굴포천 상류는 평균 BOD 농도는 2.3 mg/L로 낮은 편이지만, 중류는 5.7 mg/L로 증가하였고, 하류에서 약간 감소하였다. 상류와 중류 사이에서 오염원의 유입이 의심스러운 부분인데, 현장조사 결과 삼산3교 위쪽에서 하천으로 유입되는 흐름을 발견하였다. 이로 인해 오염부하가 증가한 것으로 판단된다. 서울외곽순환도로 교차점 주변의 서운교 하류지역은 하천단면이 급격하게 증가하여 유속이 현저히 느려져 정체현상을 보인다. 또한 여름철에는 조류의 발생도 관찰되었다.

승기천은 만수하수처리장의 방류수가 하천 유지용수로 이용되는데, BOD농도는 다른 하천에 비해 평균적으로 높은 값을 보이고 있다. 특히 상류에서는 월별 농도 변화가 심한데 이는 만수하수처리장 방류수의 하천 유지용수로의 유입 여부에 따라 수량의 변화가 심하고, 이로 인해 BOD 농도도 크게 달라진다. 하류지역인 동막교는 하천에 흐르는 유량 자체가 낮으며, 남동유수지에 저류되어 있는 유량이 많기 때문에 흐름이 거의 존재하지 않아 바람 및 남동유수지의 유량에 따른 역류현상 등으로 평균 BOD 농도가 10.5 mg/L로 높게 나타났다. 또한 주변에 남동공단이 위치해 있기 때문에 언제든지 불법 방류에 의한 영향을 받을 수 있기 때문에 각별한 주의가 요구 된다.

장만수천의 수원은 인천대공원에서 유하

한 흐름으로 유량이 많은 편은 아니지만 비교적 양호한 수질을 나타낸다. 상류와 하류의 BOD 농도는 하천환경기준으로 III(보통 수준)이고, 중류지역은 II(약간 좋음)으로 공촌천을 제외하고는 BOD 농도가 전 구간을 걸쳐 낮은 편이며, 안정된 상태이다. 그러나 만수하수처리장 입구 주변의 하류는

다른 하천의 하류와 마찬가지로 하천단면이 넓어지면서 유속이 느려지고 유량도 눈에 띄게 감소하여 수질의 변화를 야기한다. 여기서 더 내려가면 조수간만의 차이에 의해 해수가 역류하여 올라오며 이로 인한 SS 농도가 크게 증가하고, 기수 해역의 특성을 가진 갯벌에 더 가까워진다.

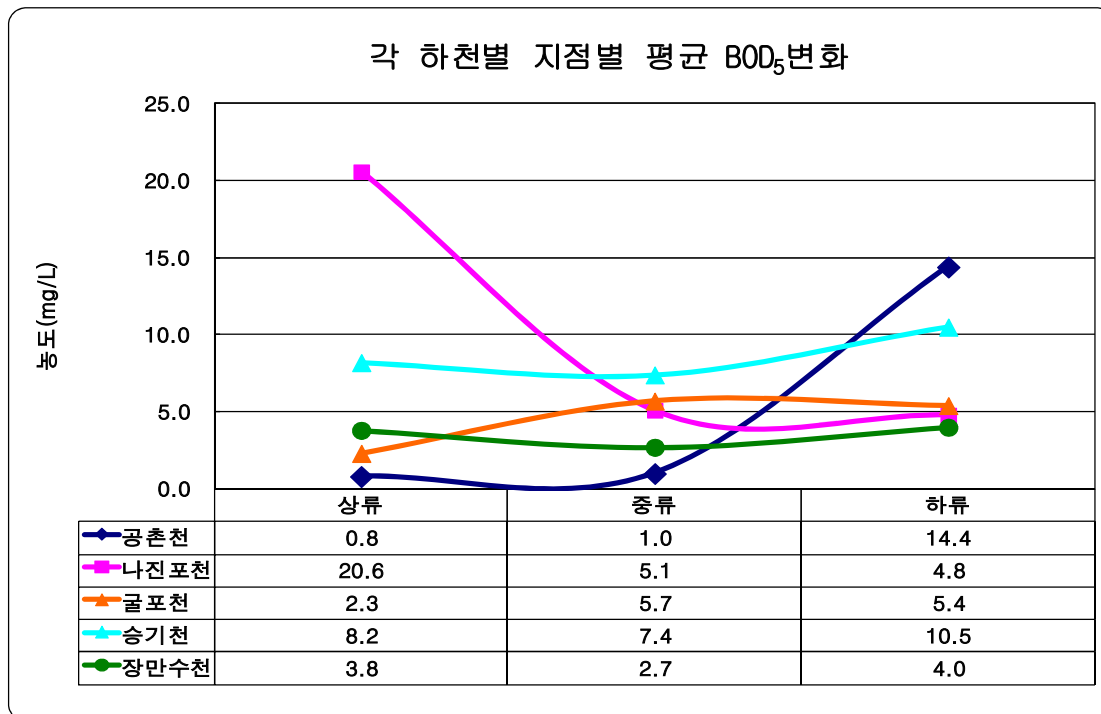


Fig. 4. 각 하천 지점별 평균 BOD₅변화

3.3 하천별 평균 중금속 모니터링 결과

각 하천의 평균 중금속 결과는 Table 5와 같은데, 중금속 분석 결과 Cr, Hg, Cd, Pb은 검출되지 않았으며 Mn, Fe, Cu, Zn, As는 미량 검출되거나 하천환경기준 이하로 검출되었다. 승기천의 경우 다른 하천들보다 중금속 평균 농도가 다소 높게 분석되었는데,

이는 승기천이 남동공단을 통과하기 때문에 적은 양의 미처리된 폐수의 유입이나 기존의 오염이 지속된 영향으로 사료된다.

생태독성 시험종인 물벼룩에 영향을 많이 주는 중금속으로는 Cu, Zn, As, Hg, Cd, Pb 등이 있는데, 자연형으로 조성된 5개 하천의 상류, 중류, 하류 모두에서 Hg, Cd, Pb은

불검출이고 나머지 항목도 낮은 값을 보이고 있어 현재로는 물벼룩에 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 그러나 물벼룩보다 독성에 대한 민감도가 높은 구멍갈파래를 이

용한 생태독성 분석에서는 60회의 검사 중 8회에서 독성 값이 나타나 중금속 농도에 대한 지속적 모니터링은 필요하다고 보여진다.

Table 5. 하천별 평균 중금속 농도 (단위 : mg/L)

| | 나진포천 | 공촌천 | 굴포천 | 승기천 | 장만수천 |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|
| Cr | ND | ND | ND | ND | ND |
| Mn | 0.039 | 0.028 | 0.020 | 0.068 | 0.070 |
| Fe | 0.192 | 0.140 | 0.151 | 0.214 | 0.331 |
| Cu | 0.008 | 0.008 | 0.008 | 0.013 | 0.008 |
| Zn | 0.021 | 0.018 | 0.019 | 0.022 | 0.019 |
| As | 0.002 | 0.001 | 0.001 | 0.002 | 0.002 |
| Hg | ND | ND | ND | ND | ND |
| Cd | ND | ND | ND | ND | ND |
| Pb | ND | ND | ND | ND | ND |

IV. 결론

인천광역시의 자연형 조성 하천인 나진포천, 공촌천, 굴포천, 승기천, 장만수천 대한 물벼룩 및 구멍갈파래를 이용한 생태독성을 평가한 결과는 다음과 같다.

1. 인천관내 5개 하천에 대해 물벼룩을 이용한 생태학적 독성 분석 결과, 자연형으로 조성된 하천의 전구간에서 생태독성 값은 0.0 TU로 나타나 독성으로부터 안전한 것으로 판단된다.
2. 생태독성의 국제적인 시험종인 물벼룩과 국내에서 연구가 활발히 진행 중인 구멍

갈파래를 이용한 생태독성 비교 분석에서 대부분 비슷한 결과를 보였으나, 물벼룩은 전구간에서 0.0 TU, 구멍갈파래는 60회 분석에서 8회 독성 값(1.1~2.1 TU)을 나타내서 구멍갈파래가 독성에 대한 민감도가 높은 것으로 나타났다. 이러한 결과를 토대로 향후 구멍갈파래가 새로운 생태독성 기준으로 적용될 때에는 법적기준의 검토가 필요하다고 본다.

3. 자연친화적으로 조성된 하천이 시민과 함께 즐길 수 있는 건강한 하천으로 자리 잡기 위해서는 먼저 하천으로 유입되는 외부 오염원의 차단이 반드시 필요하

며(나진포천, 공촌천, 굴포천), 안정된 하천유지 용수의 공급을 통해 수량을 확보해야 하천으로서의 기능을 유지할 수 있을 것으로 보인다(승기천, 장만수천).

4. 자연형 조성 하천의 산책로 이용률은 적은 편인데, 이는 외부 오염원의 유입과 수량 부족으로 인해 하천바닥은 퇴적물이 쌓여있고 이로 인한 악취를 유발하기 때문이다. 따라서 하상의 퇴적물 준설이나 정화작업을 통한 꾸준한 관리가 요구 된다.

참고문헌

1. 인천광역시, 2009, “자연형 하천 유지관리 모니터링” .
2. 인천광역시, 2010, “자연형 하천 유지관리 모니터링 요약보고서” .
3. 환경부, 2008, “생태독성관리제도 시행 및 정착을 위한 5개년 종합계획“, pp.1~33.
4. 환경부, 한국환경공단, 2010 “생태독성저감 기술지원사례집(IV)“, p.16.
5. 환경부, 2009, “하수도법“.
6. EPA, 1985, “Methods for measuring the acute toxicity of effluent to freshwater and marine organism“ (3th edition), EPA-600/4-85-013.
7. OECD, 2000, “Series on testing and assessment“, No. 23.
8. Wong, P. T. S., Dixon, D. G., 1985, “Bioassessment of Water Quality“, Enviro. Toxicity & Water Quality, 10.
9. 윤나나, 2008, “물벼룩을 이용한 부산시 도심하천 및 수로의 생물독성평가“, 부산대학교 대학원 석사학위논문.
10. Elizabeth, A. P. and Ruth, S. B., 2004, “International trends in bioassay use for effluent management“, Ecotoxicology, 13, pp. 377~398.
11. 김병석, 2000, “한국 담수산 물벼룩류를 이용한 농약의 생태독성시험법 개발“, 서울대학교 대학원 석사학위논문.
12. 신기식, 2004, “생물검정을 통한 산업폐수 수질평가“, 한양대학교 대학원 석사학위논문.
13. 환경부, 국립환경과학원, 2010, “생태독성분석기관 기술교육자료집“.
14. 환경부, 2009, “수질오염공정시험기준 제 49항 물벼룩을 이용한 급성 독성시험법“, 환경부 고시 제 2009-9호.
15. Versteeg, D. J., Stalmans, M., Dyer, S. D., janssen, C., 1997, “Ceriodaphnia and Daphnia, A comparison of their sensitivity to xenobiotics and utility as a test species“, Chemosphere, 34(4). pp. 869~892.
16. 김갑수, 김동하, 김주영, 2000, “하수의 고도처리기술“, 동화기술, pp.137~138.
17. 윤나나, 2008, “물벼룩을 이용한 부산시 도심하천 및 수로의 생물독성평가“, 부산대학교 대학원 석사학위논문.
18. 광영돈, 2009, “웅집침천처리시설의 최적 운영조건 적용을 통한 생태독성 저감사례 연구“, 인하대학교 대학원 석사학위논문.
19. 정인수, 한상훈, 2010, “인천지역 공공하수처리장의 생태독성 배출실태 연구“, 대한상하수도학회 · 한국물환경학회, 2010공동 추계학술발표회 논문집, P-54.