

QUAL2E 모형을 이용한 하천수질의 위해성평가

김정욱 · 김연수 · 강나래 · 정재원 · 김수전* · 노희성 · 김형수⁺

인하대학교 사회인프라공학과

* 컬럼비아대학교 Columbia Water Center

Risk assessment for water quality of a river using QUAL2E model

Jungwook Kim · Yonsoo Kim · Narae Kang · Jaewon Jung · Soojun Kim* ·

Huiseong Noh · Hung Soo Kim⁺

Department of Civil Engineering, Inha University, Incheon, Korea

* Columbia Water Center, Columbia University, New York, US

요 약

본 연구에서는 합리적인 수질관리를 위해서 하천의 자정능력을 고려하여 안성천 유역 내 유해성분 중 ABS(음이온 계면활성제)성분에 대해서 QUAL2E모형을 이용하여 위해성평가를 실시하였다. 수질모의결과 안성천과 진위천에서 BOD, ABS의 실측치와 예측치가 비교적 잘 일치함을 보여주고 있으며, DO에 대해서는 예측값과 실측값 사이에 오차가 발생하지만 농도변화의 추이는 잘 나타나고 있었다. 위해성지수는 오염물질의 예상 노출농도(PEC)와 하천수질에 영향을 주지 않는 예상무영향농도(PNEC)를 통해 계산하였고 위해성 비를 산정하여 위해성 지수를 평가하였다. ABS가 하천의 자정작용에 미치는 영향 분석 결과는 안성천[0.0003(Bressan), 0.06(환경부기준)], 진위천[0.0002(Bressan), 0.04(환경부기준)], ABS가 하천의 수생생태계에 미치는 영향에 대한 분석 결과는 안성천[0.0667(Bressan), 0.005(환경부기준)], 진위천[0.1(Bressan), 0.0075(환경부기준)]으로 국립환경과학원고시 제2012-30호에서 제시되어 있는 위해성이 있다고 판단되는 위해성 비의 기준치 값 1보다 작아 하천의 자정능력과 하천의 수생생태계에 영향을 주지 않은 것으로 분석되었다. 본 연구에서 적용된 방법은 간단하며 현재 환경부 수질기준보다 상세히 유해성분에 대한 정보를 줄 수 있다고 판단된다.

핵심용어 : ABS, QUAL2E, 예상 노출농도, 예상무영향농도, 위해성 비, 위해성평가

Abstract

In this study, we consider ability of self-purification for a rational water quality management. And we assess the risk of Alkyl Benzene Sulfonic acid sodium salt(ABS) of harmful ingredients in Anseong Cheon watershed using QUAL2E model. The observations and simulated results were fitted well for BOD and ABS, but even though the trend of DO concentration change was well represented, the error between observation and simulation values was existed. We assessed the Risk assessment by calculating Risk quotient(RQ) by Predicted Exposure Concentration(PEC) and Predicted No-Effect Concentration(PNEC). Results of the impact of ABS on the self-purification of the river were Anseongcheon[0.0003(Bressan), 0.06(Criteria of Ministry of environment)], Jinwicheon[0.0002(Bressan), 0.04(Criteria of Ministry of environment)]. And result of the impact of ABS on the Aquatic ecosystem of the river were Anseongcheon[0.0667(Bressan), 0.005(Criteria of Ministry of environment)], Jinwicheon[0.1(Bressan), 0.0075(Criteria of Ministry of environment)]. All of these results were smaller than the 1.0 which is the reference value suggested by Norification No.30 of the National Institute of Environment Research. So, ABS did not affect a self-purification and aquatic ecosystem of the river. The method suggested in the study is a simple one and can provide more information for harmful ingredients than criteria of Ministry of environment.

Keywords : ABS, QUAL2E, Exposure Concentration, Predicted No-Effect Concentration, Risk quotient, Risk assessment

1. 서론

인구 증가와 산업의 발전은 용수사용의 증대를 야기하였고, 이에 수반된 생활하수 및 공장폐수를 처리하기 위해 대규모 하수처리장 건설과 운영에 많은 예산이 투입되고 있지만, 수질에 문제가 되는 유해물

질의 위해성에 대한 연구가 부족하여 하천수질은 현저하게 개선되고 있지 못하고 있다. 이러한 문제점으로 인해 하천 내에 존재하는 유해물질의 위해성을 정기적으로 검토하는 것이 필요하다. 유해물질에 대한 위해성을 정기적으로 검토하기 위해 국립환경과학원에서는 대기, 수질, 환경보건, 화학물질, 교통환경

+ Corresponding Author : sookim@inha.ac.kr

분야에 대한 위해성평가를 통해 환경 및 인체에 미치는 영향을 연구하고 있다. 그 중 수질분야에서는 농중금속, 농약성분, 그리고 비점오염원 등을 다루며 이러한 성분들에 대한 위해성을 자세하게 다루고 있다. 미 환경청(US EPA)에서도 이러한 위해성평가를 보다 세부적으로 연구하고 있다.

미국의 경우 환경매체, 화학물질 또는 농약관리와 관련한 EPA법이나 산업안전보건청의 작업안전보건법(Occupational Safety and Health Act), 식품의약품의 연방 식품의약품 및 화장품법(Federal Food, Drug and Cosmetic Act), 소비용품안전위원회의 소비자제품안전법(Cosumer Product Safety Act) 등은 기본적으로 "위해성 정도"에 근거한 규제나 각종 허용기준 설정을 규정하고 있으나 위해성평가에 대한 직접적인 규정을 갖추고 있지는 않다. 그러나 미국 EPA의 발암성, 생식독성, 유전독성 및 신경독성 등 특정 end-point에 관한 지침서에는 일반적인 위해성평가의 4가지 요소 즉, 유해성확인, 용량반응평가, 노출평가 및 위해도 결정에 대한 기본적 사항이 구체적으로 서술되어 있다. 특히 미국의 발암성이나 생식독성 등 주요 end-point별 위해성평가지침, 노출평가지침, 생태 위해성평가지침 등은 10여 년 전부터 활용되고 있으며, 변화하는 기술이나 새로운 지식을 국가적 합의사항에 포함시키기 위하여 지속적으로 개정하고 있다.

Rachael Miller et al.(2009)은 음용수의 공급원 체계를 구현하는 방법의 예를 설명하고 물공급에 쓰이고 있는 위해성평가에 대해서 논의하였고, Anita Singh et al.(2010)은 토양 및 야채 그리고 관개에 사용하는 폐수의 카드뮴, 크롬, 구리, 니켈, 납, 아연 등 중금속의 위험지수를 산정하여 지역주민의 건강의 위험성을 분석하였다. Grand River Conservation Authority(2010)에서는 수원의 병원균, DNAPLs(Dense Non-Aqueous Phase Liquids), 그리고 화학물질에 대한 위해성평가를 통해 취약도 점수를 산정하였다. Peter Carsten von de Ohe et al.(2011)은 유럽연합의 물기본지침(Water Framework Directive)의 맥락에서 위험평가 및 모니터링에 화학물질의 우선순위를 둘 필요성으로 유럽하천 지역에서 500개의 유기물질의 위험성을 평가하였다. Babu Rajendran Ramaswamy(2011)는 GC-MS 분석방법을 통해 하천에 대해서 트리클로산, 카르바마제핀, 파라벤에 대해서 위해성평가를 하였다. Essex Resion Source Protection Area(2011)에서는 대수층과 지하수에서 음용수의 위해성평가를 실시하여, 가축의 존재 비율에 따른 영양물질을 조사하고 음용수의 화학적 위험도를 평가하였다. 그리고 Samantha Cooper(2011)은

유역특성을 고려한 위험도 평가를 실시하여 수질에 악영향을 미칠 수 있는 영역을 식별하였다. EA Engineering, Science, and Technology, Inc.(2011)에서는 다환 방향족 탄화수소와 휘발성 유기화합물 등 화학물질을 분석하고 천연자원으로서의 물 그리고 물이 인간의 건강 등 공중보건에 미치는 영향의 위험을 평가하였다. Alexandra V. Suhogusoff et al(2013)은 우물 건설 및 운영과 관련된 위험요인을 파악하기 위해 클러스터링 통계방법으로 질산염과 병원균을 분석하여 위해성평가를 하였다. 이렇듯 국외에서는 EPA의 위해성평가 지침이나 가이드라인을 통하여 하천, 음용수에 대해 인체에 유해한 화학물질에 대한 위해성평가를 하여 화학물질들의 위해성을 분석하고 이를 데이터화시켜 환경오염을 대비하는데 활용하고 있다.

이에 비해 우리나라의 위해성평가는 표준화된 지침이나 가이드라인이 미흡한 상태에서 시급성이 인정되는 물질 위주로 위해성평가를 실시하였다. 또한 위해성평가 결과를 정책에 반영하기 위한 연계수단이 부족하였으며, 결과가 제대로 활용되고 있는지 여부를 파악하기 어려웠다(Korea Environment Institute, 2013). National Institute of Environmental Research(1998)은 장기적인 관점에서 각 법령과 위해성평가수행기관 사이의 일관성있는 평가결과를 유지하고, 불필요한 해석상의 논쟁을 방지하기 위해서 지침서를 작성하였으며, 지침서를 개정하여 국립환경과학원고시 제2012-30호 '위해성평가의 대상물질 선정기준, 절차 및 방법 등에 관한 지침'을 통해 위해성평가 대상물질의 선정기준과 평가절차 및 방법을 제시하고 있다(National Institute of Environmental Research, 2012). 국내하천에 대한 위해성평가로 Jang et al.(2006)은 남양천의 수질관리를 위해 QUAL2E모형을 사용하여 DO, SS, BOD₅, T-N, NO₃ -N, NO₂ -N, NH₃ -N, T-P, PO₄ -P에 대해 위해성평가를 실시하였다. Lee et al.(2008)은 2000~2007년까지 낙동강 수계에 대해서 1,4-dioxane의 모니터링을 하였고, Monte-carlo simulation을 이용하여 오염도 자료로부터 인체노출평가를 수행하였다. 이후 Shin et al.(2010)은 WASP모형을 통해 망간(Mn)이 인체에 미치는 위해도의 산출 및 불확실성을 고려한 위해성평가를 실시하였다. Heo et al.(2012)은 15개의 휘발성 유기화합물을 미국 EPA의 P&T GC/MS방법을 사용하여 발암물질과 비발암성물질로 나누어 인체 준거치를 산출하여 위해성평가를 수행하였다. 수질의 위해성평가에 있어 기존 국내의 연구들은 하천수질의 위해성평가를 중심으로 이루어졌다. 최근 국외에서는 음용수 및 취수를 위한 위해성분석, 그리고 화학물질과 생물

학적 위해성평가 등이 여러 분야에서 진행되고 있으며, 구체적인 제도와 법령 등에 의해 체계적인 연구가 진행되고 있다.

본 연구를 통하여 하천수질 관리에 있어 유해성분의 분석에만 그치지 않고 유해성분에 대한 위해성을 평가하도록 한다. 본 연구에서는 유해성분 중 ABS(음이온계면활성제)에 대해서 위해성평가를 하고자 한다. 전국 하천에 확산되고 있으며 공단하천 25개소, 도시하천 17개소, 일반하천 2개소 등 총 44개소에서 허용치 0.5ppm 이상 검출되어 문제가 되고 있는 생태계 파괴 주범인 ABS를 안성천 유역에 대해서 환경자원의 하나로 인식되는 하천의 자정능력을 고려하여 McAvoy(2003)가 제시한 위해성평가방법으로 위해성평가를 하여 안성천 내 ABS의 위해성을 분석해보고 국내 합리적인 수질관리를 위해 본 연구에서 수행된 위해성평가를 검토해보도록 한다.

2. QUAL2E 모형

QUAL2E는 하천 수질 모의에 광범위하게 사용되는 모형으로 흐름방향으로 1차원의 정상상태의 수질을 모의할 수 있는 모형이다. F.D.Masch and Associates와 Texas Water Development Board(1970)에서 개발한 QUAL-I에 기반을 두고 있는 모형으로 1972년에 미국 환경부(US EPA)의 지원으로 QUAL-I를 수정하고 확장하여 QUAL-II를 개발하였고 1987년 Brown과 Barnwell이 이를 강화하여 QUAL2E모형을 개발하였다. QUAL2E모형은 EPA 수질 모델링 센터에서 관리하고 있으며, 사용자의 편의를 위하여 Windows 용 WinQUAL(1995)이 개발된 바 있다.

QUAL2E모형에서는 DO, BOD, 온도, 클로로필-a, 유기질소, 암모니아성질소, 아질산성질소, 질산성질소, 유기인, 용존성인, 대장균, 반응성물질, 비반응성물질 등 수질항목을 모의할 수 있다. 전 대상유역을 크게 n개의 구간(Reach)으로 나누고, 각 구간 내부를 소구간 요소(Elements)로 다시 나누어 농도를 소구간별로 계산한다. 이런 각 구간 내부에서는 하상경사, 하천의 종단면적, 마찰계수 등의 수리학적 특성과 BOD 분해율, 저층의 용출률, 조류의 침강속도 등의 수질반응계수가 일정하다고 가정하여 모의한다.

또한, 흐름은 정상상태의 연속방정식 또는 유량계수법으로 모의하며 물질의 이송은 Advection-Diffusion-Reaction 방정식을 연속된 완전 혼합형 반응조가 계속적으로 이어져 있는 형태로 모의한다.

3. 위해성평가

위해성평가는 환경오염물질에 노출되는 일반인에 대한 공중보건상의 위해의 특성 또는 정도를 결정하기 위한 과정이며 일반적으로 오염물질에 노출된 결과를 공중보건의 수치 값으로 평가하는 과정이라고 할 수 있다. 이 과정은 위해성확인, 용량-반응평가, 노출평가 및 위해도 결정의 단계를 거치는 데 위해성평가 결과는 궁극적으로 허용할 수 있는 오염도의 수준을 결정하거나, 유해폐기물의 배출수준 설정, 오염지역에 대한 정화수준의 목표설정 등 위해성 관리의 정책결정에 활용된다.

위해성평가 수행자마다 방법상의 이견으로 인해 결과에 대한 해석이 미흡한 경우가 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 외국에서는 위해성평가에 관한 지침을 제정·운용함으로써 위해성평가의 일정한 방향성을 제시하고 있다.

OECD에서는 회원국별로 연간 1,000톤 이상 생산·수입되는 대량생산화학물질(HPV, High Production Volume)에 대해 매년 2회의 위해성평가 전문가회의를 개최하여, 각 회원국에서 제출한 위해성평가 보고서를 검토·심의 및 승인하고 있다. 전문가회의에서 승인받은 보고서는 UNEP를 통하여 발간되며, OECD 회원국 간에 위해성평가 자료가 신뢰성있게 공유됨으로써 국제적으로 화학물질의 위해성평가 수준을 인정받게 된다.

우리나라는 2001년부터 OECD 위해성평가 사업에 참여하였다. 또한 국립환경과학원에 대량생산화학물질 위해성평가 전담팀을 구성하여 2007년까지 아세트아닐리드 등 15개 물질에 대한 위해성평가를 수행하였다. 특히 2006년 10월에는 위해성평가 전문가회의를 주최함으로써 화학물질의 위해성평가 능력 함양과 더불어 국제적으로 국가위상을 제고하였다.

3.1 위해성평가대상

위해성으로부터 보호해야 할 대상을 정의할 경우 환경과 관련지어 생태계, 개인, 특정집단 중 어떤 대상을 보호해야 할지를 결정해야 하며, 반드시 막아야 할 위해성이 있는지를 결정해야 한다. 인간의 경우는 회복불능의 위해성들(예를 들면 암, 기형발생 등)로부터 특별히 보호되는 것이 바람직하다. 또한 생태계의 경우는 종의 생존을 위협하는 위해성들(치사 관련독성, 성장과 생식 관련독성 등)에 관하여 주의를 기울일 필요가 있다. 위해성평가지 활용될 수 있는 보호

대상은 수서생태계, 육상생태계, 환경 중에 간접적으로 노출되는 포식자, 인간, 하수처리장의 미생물 등으로 Fig 1에서는 위해성 지수를 판단함에 있어 인간 이외의 생태계의 생물에게 노출된다고 예측되는 환경 중 농도인 예상노출농도(PEC)와 인간 이외의 생태계

의 생물에게 유해한 영향이 나타나지 않는다고 예측되는 환경 중 농도인 예측무영향농도(PNEC)의 산정 절차를 설명하고 있으며 인간을 고려한 환경독성물질의 배출과 효능간의 인과관계를 나타내고 있다.(Jung et al, 2008)

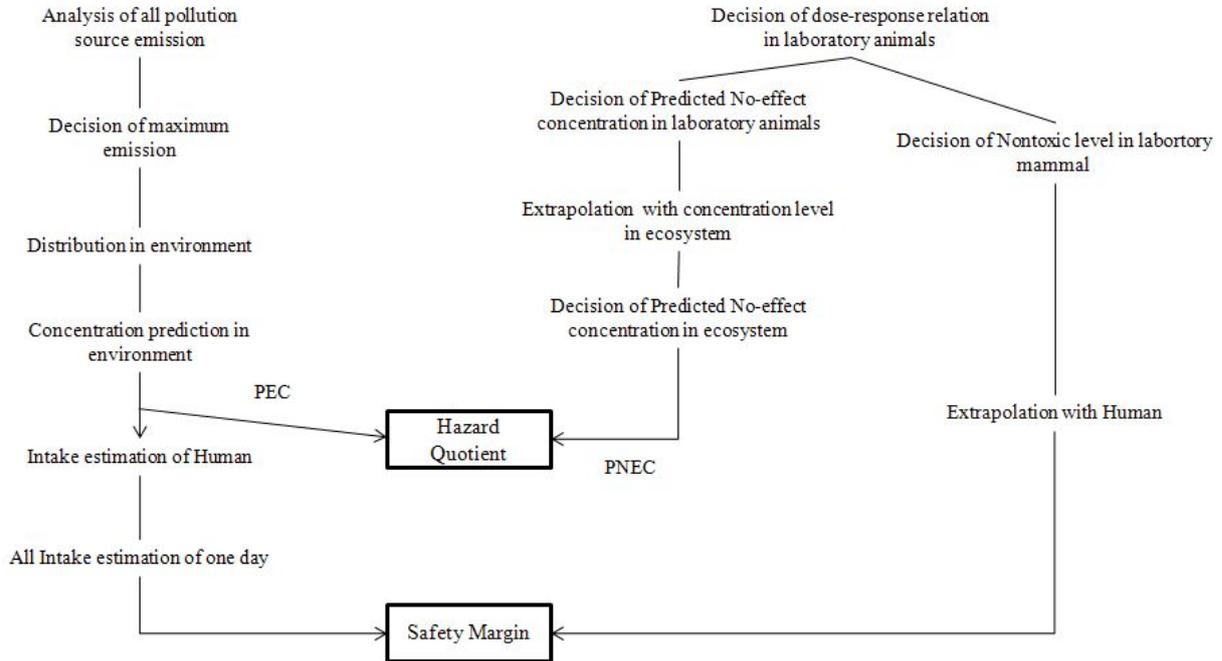


Fig 1. A causal relationship between emission and effect of environmental toxicants

4. 위해성평가방법

National Institute of Environmental Research(2012)에서는 국립환경과학원고시 제2012-30호를 통해 위해성평가 방법에 대한 지침을 제시하고 있다. Fig 2에서 볼 수 있듯이 위해성평가방법은 크게 위해성확인, 노출량-반응평가, 노출평가, 위해도 결정의 4단계로 구성되어 있으며, 해당 지침에서 화학물질 즉 오염물질

이 인체와 환경에 미치는 위해수준을 평가하고자 할 때 각 단계마다 고려해야 하는 사항을 제시하고 있다. 위해성확인에서는 지역정보, 평가대상물질선정, 유해성자료를 조사해야 하며, 노출량-반응평가에서는 비발암물질과 발암물질을 평가한다. 그리고 노출평가에서는 노출지표별로 인체에 노출된 농도/량을 추정한다. 또한 마지막으로 위해도결정에서는 오염물질의 노출에 의한 인체에 미치는 영향을 측정하게 된다.

1. Hazard Identification

Identify the hazard of chemical on the ecosystem and human body. Include the basic characteristics of area, the selection of material and research of hazard data

- (1) Ecosystem characteristic of target area
- (2) Receptors can be most sensitive to chemicals, is expressed as an index of toxicity
- (3) Quantitative and qualitative toxicological endpoints, like a fatality, the term half maximal effective concentration(EC50), No observable effect concentration(NOEC)
- (4) Information about Bio-Accumulative of chemical



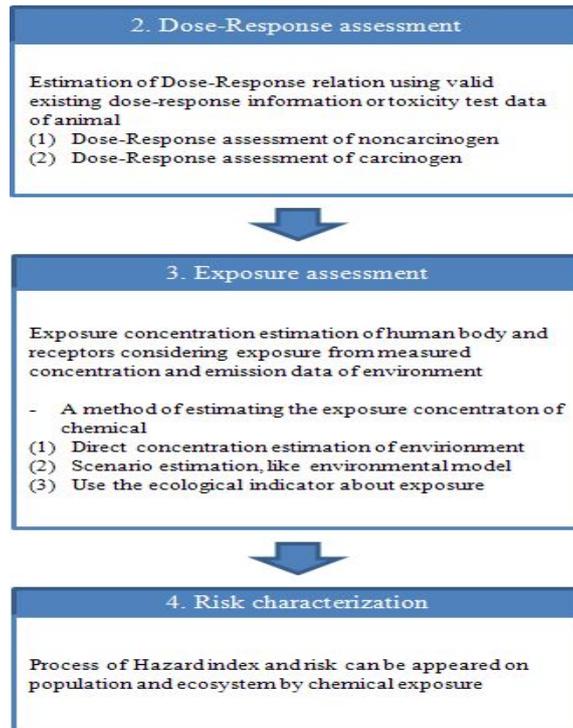


Fig 2. A method of risk assessment

4.1 영향지역 (Impact Zone)

위해성평가에 사용되는 방법은 영향지역 개념 (impact zone concept)에 근거를 두고 있다. 영향지역의 개념은 Fig 3에 그림을 통해 표현하였으며 Fig 3에서 볼 수 있듯이 영향지역의 범위는 수역의 희석도에 좌우되며, 유기물을 억제하는 용존산소와 암모니아의 농도에 의해 특성이 결정될 수 있다. 이 개념에서 수역은 자정작용을 가지는 자연적인 하수처리시스템으로 간주되며 수역을 생물분해(biodegradation), 휘발(volatilization), 수착(sorption), 그리고 침전이 발생하는 생물학적 처리시설로 생각하는 것이다. 그러므로 일단 하수의 처리가 이뤄지면 회복된 수생태계는 수생식물 또는 유기물에게 영향을 주지 않게 된다.

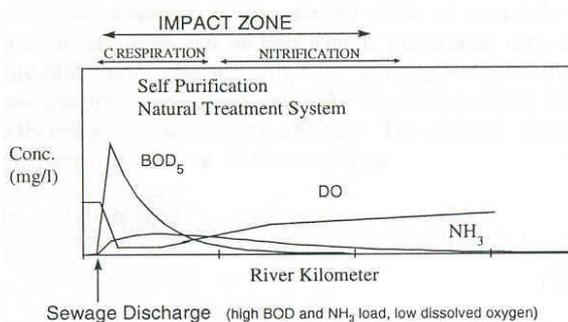


Fig 3. Concept of Impact zone

4.2 위해성 비

본 연구에서는 영향지역 개념을 근거로 대상하천의 영향지역 범위를 설정하여 인체에 위협을 주는 오염물질의 예상노출농도(PEC, Predicted Exposure Concentration)에 대해 위해성을 평가하였으며 평가과정은 크게 두 단계로 나뉜다.

첫 번째는 자정작용을 하는 유기물에 대한 잠재적 영향력을 평가하는 것이다. 이 과정에서 만약 영향지역 내 PEC가 자정작용에 영향을 주지 않는 수치보다 훨씬 적다면 그 오염물질은 자정작용에 어떠한 영향도 미치지 않는 것으로 간주된다.

두 번째는 하천이 회복된 후 잠재적인 영향력을 평가하는 것이다. 일단 하천이 미리 정해 놓은 농도(예를 들면 DO농도)로 회복하면 영향지역 끝에서의 PEC는 하천수질에 영향을 주지 않는 예상무영향농도(PNEC, Predicted No-Effect Concentration)와 비교된다.

이러한 정보로써 위해성 비는 다음 Eq. (1)로 계산된다.

$$\text{Risk quotient : RQ} = \frac{PEC}{PNEC} \quad \text{Eq. (1)}$$

국립환경과학원고시 제2012-30호에 따르면 만약 위해성 비가 1보다 작다면, 그 오염물질은 위해가 적다고 간주하며 하천의 자정작용과 수생생태계에게 영향을 주지 않는 것으로 평가된다.

5. 대상지역 및 자료현황

5.1 대상지역 현황 및 수질측정 자료

대상지역으로 안성천유역의 안성천과 진위천을 선정하였다. 안성천유역은 한반도 중서부에 위치하고 있으며 유역면적은 1,654.7km², 유로연장 70km인 하천으로서 남동쪽으로는 금강유역, 남서쪽으로는 삼교천 유역과 접하고 있다. 안성천유역의 토지이용상황은 전 유역면적의 약 56%가 농경지이며, 임야면적이 약 32%, 도시면적, 내수면적 등의 기타 면적이 약 12%이다. 안성천 수계현황을 살펴보면 안성천 본류 및 제1지류인 진위천, 제2지류인 황구지천, 오산천 4개의 국가하천이 있으며 90여 개의 지방하천이 있다.

현장 데이터 및 실험을 할 수 없으므로 안성천, 진위천의 DO, BOD, ABS의 수질측정결과는 가장 최근에 수립된 안성천수계 하천정비 기본계획(변경)(2002)에 있는 자료를 이용하였으며 Table 1에 나타내었다. 또한 수질측정지점을 Fig 4에 표시하였다.

Table 1. Anseong Cheon, Jinwi Cheon water quality data in 2001 (Basic Plan for River Maintenance of Anseong Choen Water System(Deviation),2002)

Item Point	DO (ppm)	BOD (ppm)	ABS (ppm)
AS-1	8.97	3.42	0.031
AS-2	8.82	3.55	0.015
AS-3	8.82	4.00	0.008
AS-4	7.93	6.03	0.023
AS-5	8.31	5.53	0.012
JW-1	8.24	4.92	0.009
JW-2	8.19	4.63	0.022
JW-3	8.14	4.92	0.012
JW-4	7.49	7.45	0.019
JW-5	7.86	6.55	0.021
JW-6	7.7	7.30	0.036

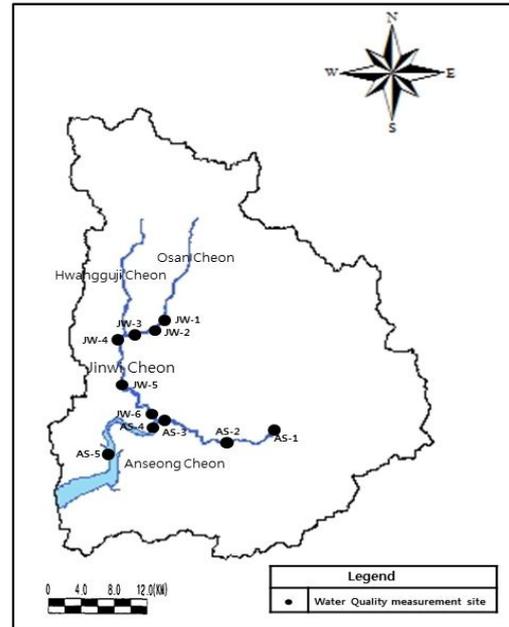


Fig 4. Water quality measurement site map of Anseong Cheon and Jinwi Cheon

5.2 ABS 농도

본 연구에서는 ABS 농도를 PEC로 선택하여 위해성을 평가하였다. ABS는 음이온 계면활성제(Anionic Surfactant)로써 합성세제와 공업용으로 사용되는 독성이 강한 성분이다. 또한 수계에 방류된 하수 및 폐수는 공공하천을 오염시키고 그 농도가 0.5 ppm 이상일 경우 거품을 발생하여 수표면에 피막을 형성하고, 수중의 산소공급을 차단하여 수질자체의 자정능력을 저하시키고 냄새, 맛 등을 일으킴으로서 미관상의 장애를 일으킨다. 합성세제의 ABS 경우 세제의 종류 및 시험동물에 따라 수중생물의 반치사 농도(TLm : 화학물질이 수중생물에 미치는 독성에 대한 시험방법의 하나로써 시험동물(물고기 등)을 일정기간동안 서식시켜 그 반수가 사망하는 화학물질인 농도를 나타낸 것이 TLm(median Tolerance Limit)이다. TLm는 물고기 종류에 따라 차이가 있으나 일반적으로 0.1~0.3 ppm 이상이 되면 물고기의 생존에 지장을 주는 것으로 보고되고 있으며, 이 농도는 음용수의 허용치인 0.5 ppm보다도 낮은 농도에 해당된다.

6. QUAL2E 모형의 적용 및 결과

대상지역인 안성천수계를 2개의 하천으로 구분하여 BOD, DO, ABS 농도에 대하여 수질예측을 실시하였다. 이중 유해성분으로 선택한 ABS 농도는 비보존성물질로 간주하여 모의하였다. QUAL2E로 모의하기

위해 안성천과 진위천을 각각 4, 5개의 구역(Reach)으로 분리하였으며 안성천의 경우 Reach 3에서 진위천의 유입을 점오염원으로, 진위천의 경우 Reach 1, Reach 3에서 각각 오산천, 황구지천을 점오염원으로 설정하였다(Fig 6).

적용 후 모의결과의 타당성을 확인하기 위해 QUAL2E-UNCAS의 일차오차분석(FOAU)으로 불확실도 분석을 실시하였다. 분석시 10%, 20%의 입력변수의 변동률을 사용하였으며 거의 변화가 없음을 확인하였다. 모의결과는 Fig 5와 Table 2에 나타내었다. Table 2에서 볼 수 있듯이 BOD의 경우 안성천과 진위천 모두 보통(AS-1,2,3과 JW-1,2,3) ~ 약간 나쁨

(AS-4와 JW-4,5)의 수질을 나타내었으며, DO의 경우 안성천에서는 모두 매우 좋음의 수질을 나타내었으나, 진위천의 JW-4에서는 DO가 7.5 이하이므로 좋음의 수질을 나타내었다. ABS의 경우 안성천과 진위천 모두 0.01~0.03 사이의 수치를 보여 0.5이하로 규정되어 있는 사람의 건강보호 기준을 충족하였다. 모의결과 Fig 5와 같이 BOD, ABS의 실측치와 예측치가 비교적 잘 일치함을 보여주고 있지만, DO에 대해서는 예측값과 실측값 사이에 오차가 발생하였다. 하지만 DO수치 역시 농도 변화의 추이는 잘 나타내고 있는 것으로 분석되었다.

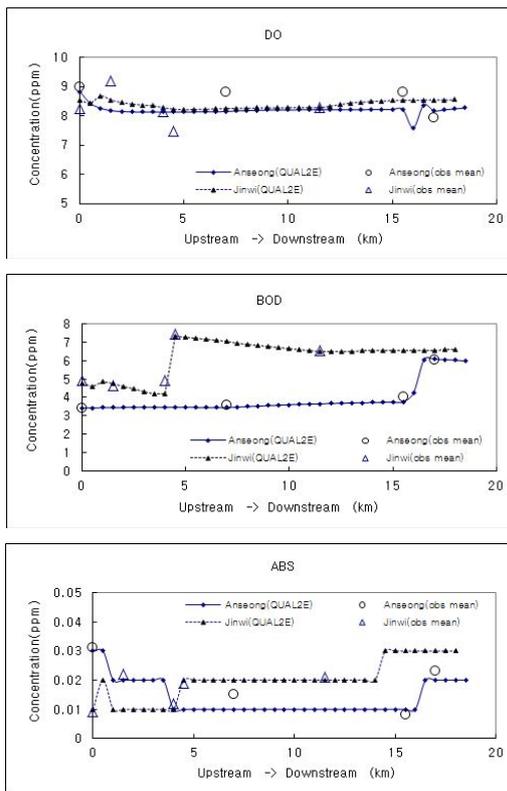


Fig 5. Result of water quality simulation of Anseong Cheon and Jinwi Cheon

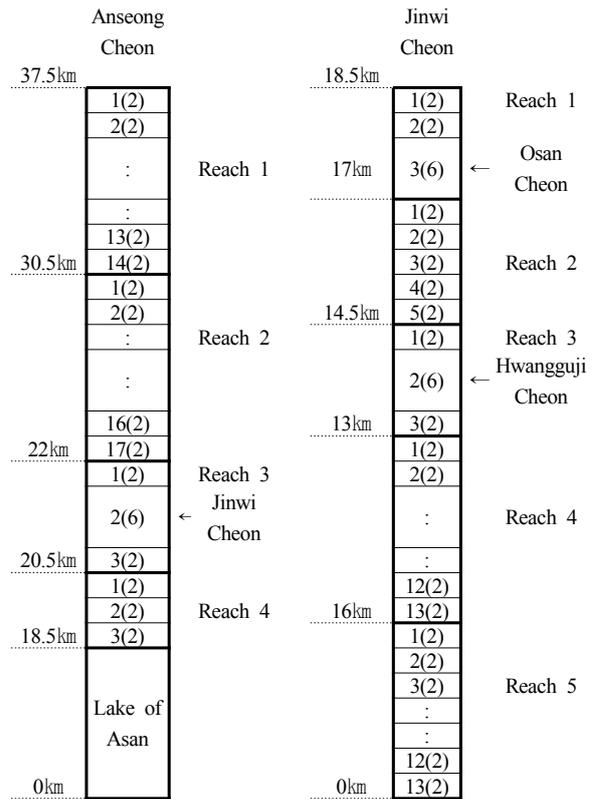


Fig 6. A schematic diagram of Anseong Cheon and Jinwi Cheon

Table 2. Result of Water quality simulation (Unit : ppm)

Division	Item Point	BOD			DO			ABS		
		Predictive value	Observation value	Standard deviation	Predictive value	Observation value	Standard deviation	Predictive value	Observation value	Standard deviation
Anseong Cheon	AS-1	3.44	3.42	0.01	8.82	8.97	0.11	0.03	0.031	0.001
	AS-2	3.55	3.44	0.08	8.15	8.82	0.47	0.01	0.015	0.004
	AS-3	4.00	3.76	0.17	8.22	8.82	0.42	0.01	0.008	0.001
	AS-4	6.03	6.09	0.04	7.93	7.93	0.17	0.02	0.023	0.002
Jinwi Cheon	JW-1	4.76	4.92	0.11	8.56	8.24	0.16	0.01	0.009	0.001
	JW-2	4.74	4.63	0.08	8.54	8.19	0.18	0.01	0.022	0.009
	JW-3	4.22	4.92	0.49	8.32	8.14	0.09	0.01	0.012	0.001
	JW-4	7.36	7.45	0.06	7.36	7.49	0.07	0.02	0.019	0.001
	JW-5	6.50	6.55	0.04	8.10	7.86	0.12	0.02	0.021	0.001

7. 위해성평가

위해성평가의 첫 번째 단계는 ABS 농도가 하천의 자정작용을 책임지고 있는 미생물에게 영향을 주지 않는다는 것을 확인해야 한다. Bressan 등(1989)은 활성오니에 대해 무영향농도(No Observable Effect Concentration, NOEC)를 200 ppm 이상, 질화세균에 대해 NOEC를 100 ppm 이상이라 제시하였다. 또한 환경부에서는 1991년 수질환경기준 4차 개정을 통해 하

천의 수질환경기준에서 ABS를 추가하였으며, 2006년 수질 및 수생태계 환경기준 5차 개정을 통해 ABS 성분의 규제농도를 0.5 ppm 이하로 정하고 있다.

여기서 미생물이 안성천, 진위천의 자정작용에 기여하고 있다고 가정한다면 ABS의 자정작용 PNEC는 최대 100 ppm으로 설정할 수 있다. 모의결과에서 ABS의 가장 높은 예측농도가 안성천의 경우 0.03 ppm, 진위천의 경우 0.02 ppm의 결과를 보이고 있으며 위해성 비는 Table 3과 같다.

Table 3. The first step of Risk assessment - Assessment of the impact of ABS on the self-purification of the river

	Bressan (1989)	Criteria of Ministry of environment(2006)
Anseong Cheon	$\frac{PEC}{PNEC} = \frac{0.03}{100} = 0.0003 < 1$	$\frac{PEC}{PNEC} = \frac{0.03}{0.5} = 0.06 < 1$
Jinwi Cheon	$\frac{PEC}{PNEC} = \frac{0.02}{100} = 0.0002 < 1$	$\frac{PEC}{PNEC} = \frac{0.02}{0.5} = 0.04 < 1$

위해성평가의 두 번째 단계는 자정작용으로 영향 지역 내 수질이 회복된 후 ABS 농도가 수생태계에 어떠한 영향도 미치지 않음을 확인하는 것이다. 미 환경청의 환경수질기준(US EPA, 1986)에서는 연어과

의 물고기가 살 수 없는 DO의 한계값을 4 ppm로 정하고 있으므로(Table 4), 이 평가과정에서 하천의 수질회복에 대한 수질기준을 DO 농도 4 ppm로 설정하였다.

Table 4. Water quality standard for salmonidae fish is uninhabitable (US EPA, 1986)

DO (ppm)	Fish (early life stage)	Fish (other life stage)	Invertebrates
8.0			No impairment
6.5	No impairment		
6.0		No impairment	
5.5	Slight impairment		
5.0	Moderate impairment	Slight impairment	Some impairment
4.5	Severe impairment		
4.0	Acute mortality	Moderate impairment	Acute mortality
3.5		Severe impairment	
3.0		Acute mortality	

QUAL2E로 예측한 결과를 살펴보면 Table 2의 Predictive value값에서 안성천, 진위천 모두 DO의 범위가 7~9ppm으로 하천 전구간이 영향지역으로 간주할 수 있으며, 수질회복을 할 수 있는 능력을 가졌다고 할 수 있으므로 하천의 끝부분에서 ABS 농도에 대한 PEC는 안성천의 경우 0.02ppm, 진위천의 경우 0.03ppm이다. 현재 우리나라에서는 ABS 농도에 대한 세분화된 수질기준이 없으므로 합성세제가 물고기의 생존에 영향을 주는 일반적인 농도 0.1~0.3 ppm(Korea Institute of Construction Technology, 1990)와 더불어 도시거주인의 소변 내 합성세제 농도 4 ppm이하(Han River Environment Research Center, 2000)를 이용하여 위해성을 평가하면 Table 5와 같다.

Table 5은 ABS가 안성천과 진위천의 어류와 인체에 위해성이 있는지 분석한 결과를 나타낸 것으로 위해성평가의 대상물질 선정기준, 절차 및 방법 등에 관한 지침(Norification No.30 of the National Institute of Environment Research)을 보면 위해성평가에서 위해성 비가 1 이상일 때 해당 화학물질은 위해성이 있다고 간주한다고 명시되어 있다. 따라서 이를 기준으로 하여 위해성을 평가한다면 모든 결과에서 위해성 비가 지표수치(the trigger value) 1에 훨씬 못 미치는 결과를 보이므로 ABS 농도가 하천의 자정작용 저하와 수생태계에 영향을 주지 않는다고 판단할 수 있다.

Table 5. The second step of Risk assessment - Assessment of the impact of ABS on the Aquatic ecosystem of the river

Division	Fish	Human body
Anseong Cheon	$\frac{PEC}{PNEC} = \frac{0.02}{0.3} = 0.0667 < 1$	$\frac{PEC}{PNEC} = \frac{0.02}{4} = 0.005 < 1$
Jinwi Cheon	$\frac{PEC}{PNEC} = \frac{0.03}{0.3} = 0.1 < 1$	$\frac{PEC}{PNEC} = \frac{0.03}{4} = 0.0075 < 1$

8. 결과 및 고찰

본 연구는 QUAL2E를 이용하여 안성천, 진위천의 DO, BOD, ABS 농도를 모의하였으며 예측값과 실측값이 비교적 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. 또한 예측한 결과를 이용하여 오염성분 중 수질과 인체에 유해한 오염성분인 ABS 성분에 대해 위해성을 평가하였으며 위해성 비가 1이하로 ABS 농도는 하천의 자정능력 및 수생생태계 그리고 인체에 악영향을 주지 않는 것으로 평가되었다. 이는 하천의 자정능력과 관련된 DO 농도가 BOD 농도에 비해 하천 전 구간에서 걸쳐 생활환경 기준(Enforcement Decree of the Framework Act on Environmental Policy, A Presidential Decree No.24203) Ia(매우 좋음), Ib(좋음)의 수질을 나타내어 하천의 자정능력이 좋기 때문이라고 판단된다.

그리고, 하천의 자정능력을 고려하여 유해오염성분이 하천환경에 미치는 영향을 평가하기 위한 방법을 적용하여 그 결과를 분석하였는데 본 논문에서 적용된 방법은 간단하면서도 현재 환경부 수질기준보다 상세하게 유해성분에 대한 정보를 줄 수 있다고 판단된다. 이러한 상대적인 평가방법이 적용되기 위해서 적절한 과학적 사실에 맞는 수질기준을 설정하거나 적절한 안전한계를 허용하여 인체에 악영향이 없는 음용수 기준을 설정하는 등의 위해성평가를 위한 기준이 필요하다. 즉, 앞으로는 실제적으로 인간이나 환경에 끼칠 수 있는 “위해”의 정도가 정해진 크기 이상이고, 이러한 위해성을 크게 하는 요인을 확인하여 그 요인을 줄이는 규제를 명확히 제시하고 오염성분에 대한 보다 세분화된 기준과 수치가 제시되어야 할 것이다.

Acknowledgements

이 논문은 인하대학교 교내연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.

References

Bressan, M, Brunetti, R, Casellato, S, Fava, GC, Giro, P, Matrin, M, Negriolo, P, Tallandi, L, Thomann, S, Tosoni, M and Turchetto, M(1989). Effects of linear alkylbenzene sulfonate(LAS) on benthic organisms, *Tenside Surfactant Detergents*, 26(2), pp. 148-158.

Cooper, S(2011). *A GIS-Based Water Quality Risk Assessment of Thompson Region Watersheds*, Ministry of Environment Thompson Region.

EA Engineering, Science, and Technology, Inc.(2011). *Risk Assessment of Offshore Areas Adjacent to the Proposed Coke Point Dredged Material Containment Facility at Sparrows Point*, EA Engineering, Science, and Technology, Inc.

Essex Resion Conservation Authority(2011). *Water Quality Risk Assessment(Chapter 4)*, Essex Resion Conservation Authority.

Grand River Conservation Authority(2010). *Water Quality Risk Assessment-Source Water Protection-Lake Erie Resion(Chapter 4)*, Grand River Conservation Authority.

Han River Environment Research Center(2000). *What is the Development History and Pollution Effect of the Synthetic Detergent?*, Han River Environment Research Center. [Korean Literature]

Heo, SM, Lee, IJ, Lim, TH, Lim, YK, Cheon, SU and Lee, JG (2012). Monitoring of volatile organic compounds in Nakdong river system and risk assessment, *J. of Korean Society for Environmental Analysis*, 15(3), pp. 188-196. [Korean Literature]

Jang, JH, Yoon CG, Jung, KW and Kim, HC(2006). Application of the QUAL2E model and risk assessment for water quality management in Namyang stream in Hwaong polder, *J. of Korean Society of Limnology*, 39(1), pp. 110-118. [Korean Literature]

Jung, MG, Lee, CK, Oh, GJ, Jang, SI, Gong, IC, Kwon, JH, Kwon, YH, Yoo, HJ, Kim, DW, Lee, NH, Lee, CK, Jo, YJ and Seo, YC(2008). *An Introduction to*

- Environment Engineering*, DongHwa Technology Publishing, Paju, Korea. [Korean Literature]
- Korea Environment Institute(2013). *Study on the Establishment of Chemical Action Plan for Enhancing the Policy Applicability of Risk Assessment(I)*, Korea Environment Institute. [Korean Literature]
- Korea Institute of Construction Technology(1990). *Study on the Effect of Synthetic Detergent on the Water Treatment Processes*, Korea Institute of Construction Technology.
- Leeuwen C.(1995). *Risk Assessment of Chemicals : An Introduction*, Kluwer Academic Publishers.
- Lee JY, Kim, JH, Kim, HK, Choi, JH and Pyo, HS(2008). The risk assessment of 1,4-Dioxane in drinking water sample of Nakdong river, *J. of Korean Society of Environmental Toxicology*, pp. 85. [Korean Literature]
- McAvoy, DC, Masscheleyn, P, Peng, C, Morrall, SW, Casilla, AB, Lim, LMU and Gregorio, EG (2003). Risk assessment approach for untreated wastewater using the QUAL2E water quality model, *Chemosphere*, 52(1), pp. 55-66.
- Ministry of Construction & Transportation(2002). *Basic Plan for River Maintenance of Anseong Choen Water System(Deviation) (Anseongcheon, Jinwichoen, Hwanggu-jicheon, Osancheon)*, 11-1500185-000024-14, Ministry of Construction & Transportation [Korean Literature]
- Ministry of environment(2013). *Enforcement Decree of the Framework Act on Environmental Policy*, A Presidential Decree No.24203, Ministry of Environment. [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research(2000). *History of Development and Direction in Pollution of Synthetic Detergent*, National Institute of Environmental Research. [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research(1998). *Risk Assessment of Environment and Management Method of Development(1)*, National Institute of Environmental Research. [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research(2012). *Risk Assessment Guidelines of Material Selection, Procedure and Method*, Norification No.30 of the National Institute of Environment Research. [Korean Literature]
- Ohe, PC, Dulio, V, Slobodnik, J, Deckere, D, Kuhne, R, Ebert, RU, Ginebreda, A, Cooman, W, Schuumann, G and Brack, W(2011). A new risk assessment approach for the prioritization of 500 classical and emerging organic microcontaminants as potential river basin specific pollutants under the European Water Framework Directive, *J. of Science of The Total Environment*, 409(11), pp. 2064-2077.
- Rachael Miller et al.(2009). *Risk Assessment for Drinking Water Sources*, Research Report 78, Water Quality Research Australia.
- Ramaswamy, BR, Shanmugam, G, Velu, G, Rengaragan, B and Larsson, H(2011). GC-MS analysis and ecotoxicological risk assessment of triclosan, carbamazepine and parabens in Indian rivers, *J. of Hazardous Materials*, 186(2-3), pp. 1586-1593.
- Shin, YR, Yoon CG, Jeon, NJ, and Rhee, HP(2010). Quantitative risk assessment method for metals in water body using WASP, *J. of Korean Society on Water Quality*, 26(4), pp. 629-636. [Korean Literature]
- Singh, A, Sharma, RK, Agrawal, M and Marshall, F(2010). Risk assessment of heavy metal toxicity through contaminated vegetables from waste water irrigated area of Varanasi, India, *J. of Tropical Ecology*, 51(2), pp. 375-387.
- Suhogusoff, A, Hirata, R and Ferrari, LC(2013). Water quality and risk assessment of dug wells : a case study for a poor community in the city of Sao Paulo. Brazil, *J. of Environ Earth Sciences*, 68(3), pp. 899-910.
- US EPA(1986). *Quality Criteria for Water 1986*, EPA 440/5-86-001, US EPA.

- 논문접수일 : 2014년 05월 22일
- 심사의뢰일 : 2014년 06월 11일
- 심사완료일 : 2014년 08월 20일