

환경영향평가에 사용되는 컴퓨터 모델에 관한 연구 I : 수질 모델

박석순 · 나은혜

이화여자대학교 공과대학 환경학과

A Study of Computer Models Used in Environmental Impact Assessment I : Water Quality Models

Park, Seok-Soon · Na, Eun-Hye

Department of Environmental Science and Engineering, Ewha Womans University

Abstract

This paper presents a study of water quality model applications in environmental impact statements which were submitted during recent years in Korea. Most of the applications have reported that the development projects would have significant impacts on the water quality, especially, of streams and rivers. The water quality models, however, were hardly used as an impact prediction tool. Even in the cases where models were used, calibration and verification studies were not performed and thus the predicted results would not be reliable. These poor model applications in environmental impact assessment can be attributable to the fact that there were no available model application guidelines as well as no requirements by the review agency. In addition, the expected waste loads were improperly estimated in most cases, especially in non-point sources, and the predicted parameters were not good enough to understand water quality problems expected from the proposed plans. The effects of mitigation measures were not analyzed in most cases. Again, these can be attributed to no formal guidelines available for impact predictions until now. A brief guideline is described in this paper, including model selection, calibration and verification, impact prediction, and analysis of effects of mitigation measures. The results of this study indicate that the model application should be required to overcome the current improper predictions of environmental impacts and the guidelines should be developed in detail and provided.

Keyword: Environmental Impact Assessment, Water Quality Models, Impact Prediction Methods

I. 서론

환경영향평가에서 일반적으로 사용되는 방법들은 크게 세 가지 부류로 나누어 볼 수 있다. 이들 중 두 가지는 매우 유사한 것으로 평가항목이나 중점평가항목을 선정하는데 사용되는 방법(Impact Identification Method)과 항목별로 평가한 후 이를 종합 평가하는 방법(Impact Evaluation Method)이다. 현재 널리 사용되는 항목선정방법으로는 체크리스트법(Checklist Method), 행렬식대조표(Interaction Matrix), 네트워크법(Network Method) 등이 있으며 종합평가방법으로는 이러한 방법을 변형한 바텔평가시스템(Battelle Evaluation System), 레오폴드 행렬법(Leopold Interaction Matrix), 세렌슨 네트워크법(Sorensen Network System) 등이 있다^{11),12),15)}. 이러한 방법들은 1970년대 미국에서 처음으로 환경영향평가 제도가 시행된 이후 초기에는 활발히 연구개발되었으나 적용의 한계로 인하여 지금은 연구가 부진하다. 이러한 방법들은 평가자들의 주관이 크게 작용하고 평가 결과를 계량화하는 것이 매우 어렵기 때문에 대부분의 환경영향평가에서 평가항목선정과 종합평가는 정량적 방법을 따르기보다는 평가자와 관련전문가들의 주관에 좌우된다.

환경영향평가에서 사용되는 나머지 한 방법은 영향을 예측하는 방법(Impact Prediction Method)으로 사업으로 인하여 야기되는 환경영향요소가 환경인자에 미치는 영향을 사전에 예측하는데 사용된다. 영향예측을 위하여 여러 가지 방법이 사용될 수 있으나 그 중에서 환경모델은 가장 과학적이고 합리적인 방법이며 정량적 예측이 가능하기 때문에 앞에서 기술한 두 방법과는 달리 현재 활발한 이용과 연구가 이루어지고 있다. 국내에서는 환경영향평가가 시작된 이후 해외에서 개발된 여러 가지 형태의 환경 모델들이 무분별하게 사용되어 왔으며 이로 인하여 평가서에 기술된 영향예측과 저감효과 분석에 대한 신뢰성이 크게

떨어지는 것으로 보고되고 있다.

본 연구의 목적은 최근 국내 환경영향평가에서 사용되고 있는 수질모델의 활용을 검토하고 사용시 문제점과 개선방안을 제시하는 것이다. 또한 대상 수계와 사업 특성과 따라 모델 선정과 적용 지침을 제시하여 장래 환경영향평가 기술을 향상시키고자 한다.

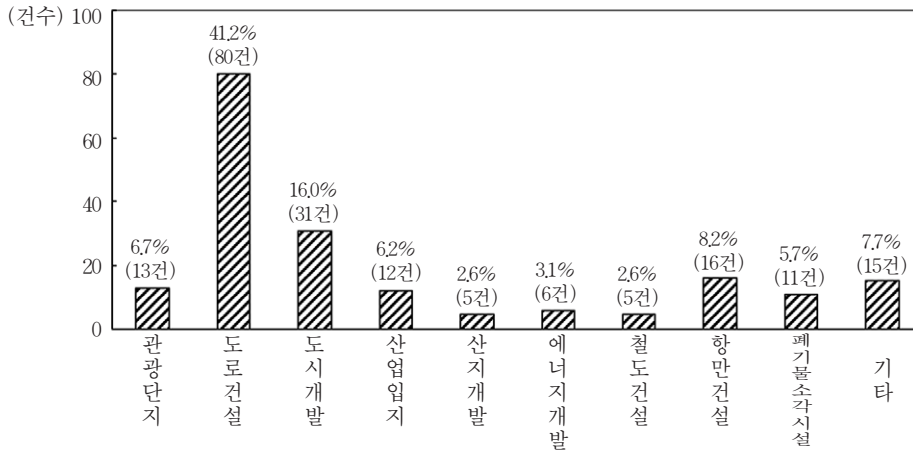
II. 적용 현황

1. 검토 대상

현재 국내에서 환경영향평가지 수질 분야에서 이루어지고 있는 평가방법과 모델 적용현황을 파악하기 위하여 1997년 7월부터 1998년 10월까지 환경정책평가연구원에 접수된 194건의 평가서를 검토하였다. 검토한 평가서들은 우리나라 환경영향평가제도에서 일반적으로 다루는 사업들을 대부분 포함하고 있어 본 연구의 목적에 적절한 것으로 판단되었다. 1997년 이전에 접수된 평가서는 전량을 구할 수 없었기 때문에 본 연구의 통계자료 비교에는 포함하지 못하고, 1997년 이후 자료와 내용을 비교하는데만 사용되었다. 비교결과 두 자료는 수질 분야의 평가방법과 모델 적용에서 큰 차이가 없음을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서 검토한 수질 분야 평가현황은 과거 몇 년간 국내에서 지속되어 온 것이라 하여도 무리가 없으리라 사료된다.

본 연구에서 검토한 평가서에 나타난 사업을 사업 특성별로 분류하면 <그림 1>과 같다. 그림에서 보듯이 도로건설이 전체의 41.2%(80건)로 가장 많았으며 다음이 도시개발, 항만건설, 관광단지 조성사업 등의 순서로 나타났다. 그 외 댐건설이나 하천이용 등 다양한 사업에 대한 평가서가 검토되었다.

또한 평가서에서 계획하고 있는 사업이 이루어



*기타 : 매립 및 개간, 댐건설, 국방·군사시설, 하천이용 및 개발사업 등

그림 1. 검토대상 평가서의 사업분야별 분류

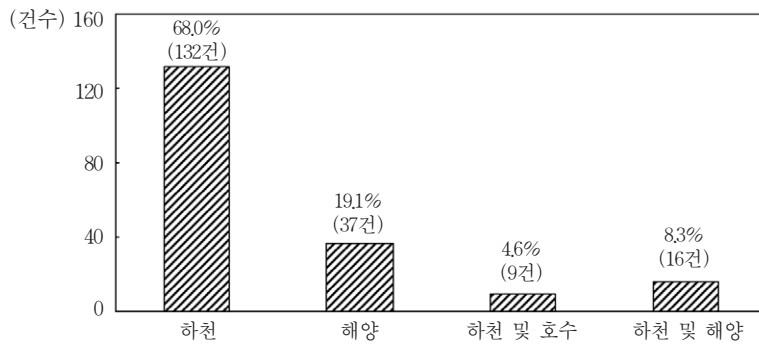


그림 2. 검토대상 평가서의 대상수계별 분류

지는 위치를 수용 수체별로 분류하면 <그림 2>와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 평가 사업 중 하천을 수용 수체로 하는 경우가 전체의 68.0%(132건)에 해당하였다. 항만 건설이나 해안 매립과 같이 해양만을 대상으로 시행되는 사업이 19.1%(37건)인 것으로 조사되었으며 호수나 해양이 영향권내 최종 수용 수체일 경우라도 모두 하천을 경유하고 있었다. 하천과 해양이 동시에 수용 수체가 되는 사업은 8.3%(16건)으로 조사되었으며, 하천과 호수가 수용 수체가 되는 사업은 4.6%(9건)으로 조사되었다. 총 사업 중 80% 이상에서 하천

의 수리수문과 수질이 평가 대상 환경인자로 나타나고 있었다. 이는 하천이 수리수문과 수질분야에서 가장 주요하게 다루어야 할 수체임을 의미한다.

2. 평가방법 및 모델적용 현황

검토 평가서 중 수질분야 평가 현황을 파악하기 위하여 평가서에서 수질 분야 평가 항목 지정 여부를 조사하였으며, 조사 결과는 <그림 3>에 제시하였다. 그림에서 보듯이 총 검토 건수(194건)

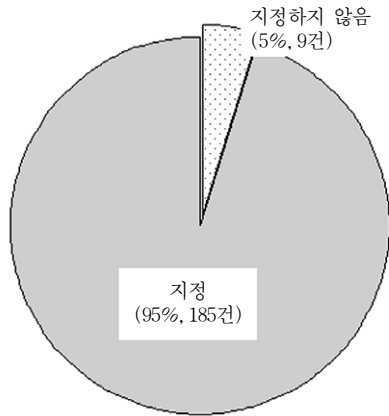


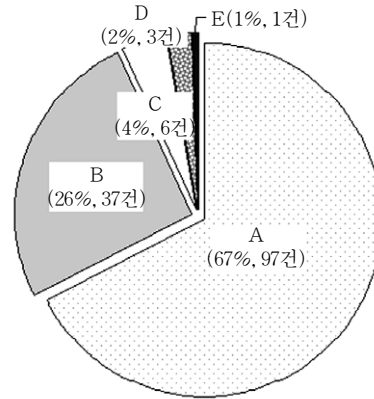
그림 3. 수질분야 평가항목 지정여부

중 수질을 중요한 항목으로 지정하고 있는 건수는 95%(185건)로 대부분의 사업에서 수질이 중요한 항목으로 다루어지고 있으며, 평가항목으로 지정하고 있지 않은 9건 모두 대상수체가 해양인 사업으로 해양수질에서 평가가 이루어졌다. 따라서 수질분야의 경우 육상 수질에 관련된 모든 사업이 평가항목으로 지정하고 있었다.

또한 사업으로 인해 야기되는 수질변화 예측방법을 비교하였으며, 그 결과를 <그림 4>에 제시하였다. 검토한 평가서는 철도건설이나 공항건설 그리고 소각장 건설과 같이 수질에 미치는 영향이 비교적 경미한 사업과 대상수체가 해양인 사업을 제외한 총 144건이다.

조사결과 사업시행으로 야기되는 영향을 부하량 산정으로만 제시한 경우가 67%(97건)이었으며, 26%(37건)는 완전혼합식으로 수용하천에서 예상되는 수질을 계산하여 제시하고 있다. 그 외 Joseph & Sender 식과 Fick's 식을 이용하여 유입지점 2차원 수질분포를 나타낸 경우가 각각 한 건씩 있었으며 Vollenweider식으로 호수 부영양화 가능성을 예측한 경우가 한 건이 있었다. 조사된 평가서(144건) 중 전산모형을 사용하여 영향을 예측한 건수는 4%(6건)에 불과하였다.

전산모형을 사용한 사업과 모델명을 <표 1>에



- A : 오염부하량 산정 및 합리식을 이용한 우수유출량 산정
- B : A 과정 후 완전혼합식을 이용하여 수용하천에 미치는 영향예측
- C : 전산모형을 이용한 영향예측
- D : 수식을 이용한 영향예측
- E : 전문가의 견해를 통한 영향예측

그림 4. 수질분야 영향예측방법

제시하였다. 전산모형이 사용된 사업분야는 댐건설, 매립 및 개간, 도로건설, 에너지개발, 도시 및 관광단지 개발사업 등이며, 이는 공사시에는 강우로 인한 토사유출이 발생하고 이용시에는 생활하수나 산업폐수가 유입되어 수용 수체의 수질 악화를 초래하는 수질 중점평가사업에 해당한다. 사용된 모델은 총 5가지로, 가장 빈도 높게 사용된 모델은 미국연방환경보호청(USEPA)에 의해서 개발된 QUAL2E모델이었다.

III. 문제점 및 개선방안

검토된 평가서에서 수질의 경우 해양에서 이루지는 사업을 제외한 모든 사업에서 평가가 이루어지고 있으나 모델은 극히 드물게 사용되고 있다. 평가가 이루어져야할 대상수체는 대부분 하천이고 하천수질모델이 대기나 해양모델에 비해 사용이 용이하고 예측력이 좋은 점을 고려하면, 지금까지 수질분야에서 좋은 예측도구가 있는데

표 1. 영향평가에 사용된 수질모델

모델명	사용건수	사업명(작성년도)	사업분야	대상수계
QUAL2E	4/6	강촌스키리조트 건설사업 (97.10)	관광단지	하천
		달성군 직영하천 골재채취사업 (97.11)	하천이용 및 개발	하천
		수원시 하수종말처리장(2단계) 증설공사 (98.3)	도시개발	하천
		영월 다목적댐 건설사업 (97.4)*	댐건설	하천 및 호수
WQRRS	2/6	예천 양수발전소 건설사업 (98.9)	에너지 개발	하천
		영월 다목적댐 건설사업 (97.4)*	댐건설	하천 및 호수
WASP5	1/6	마동지구 농어촌 용수개발사업 (97.11)*	매립 및 개간	하천 및 해양
FEMWASP	1/6	영월 다목적댐 건설사업 (97.4)*	댐건설	하천 및 호수
BOX	1/6	마동지구 농어촌용수개발사업(97.11)*	매립 및 개간	하천 및 해양

*2개이상의 모델을 사용한 사업

도 불구하고 사용되지 않고 있음을 알 수 있다. 또한 하천수질모델은 저감대책에 따른 수질 개선 효과를 정량적으로 파악하고 최적의 안을 선택하는 좋은 도구로 사용될 수 있다. 수질분야 영향예측 방법에서 나타난 문제점은 다음과 같이 요약될 수 있다.

- 1) 대상 사업이 수용수체의 수질에 미치는 환경 영향요소를 적절히 파악하지 못하고 있다. 즉 대부분의 경우 공사시 토사 유출과 이용시 발생하는 점오염원만을 수질에 미치는 영향요소로 고려하고 있다. 이용시 비점오염물질 발생은 개발사업에서 중요하게 고려되어야 하는데도 불구하고 거의 모든 사업에서 수질 변화를 유발하는 환경영향요소로 간주하지 않고 있다.
- 2) 수질 모델이 사용될 경우 정확하고 정량적인 예측이 가능한 평가사업이 대부분이었으나 극히 제한된 보고서에서 모델 사용이 이루어지고 있다.
- 3) 사업 지구로부터 발생하는 오염부하량이 합리적으로 산정되어야 하나 산정기준이 일정하지 못하다. 특히 공사시 지면으로부터 발생하는 토사유출과 이용시 비점오염물질은 유역모델을 이용하여 산정되어야 하나 모델 이용이 이루어지지 않고 있다.

- 4) 대상 수계와 사업의 특성에 적절한 수질모델이 선정되어 사용되어야 하나 모델 선정이 제대로 이루어지지 못하고 있다. 예를 들어 수심이 깊은 댐을 건설하는 사업에서 수직 2차원 모델이 적용되어야 적절한 수질변화를 예측할 수 있는 수체에서 수평 2차원 모델을 적용하는 사례가 나타나고 있다.
- 5) 모델 적용시 대상 수체의 수질에 적절하게 모델계수가 보정되고 검증되어야 하나 보정 및 검증 과정을 거치지 않고 있으며 이로 인하여 예측 결과에 대한 신뢰도가 크게 떨어진다.
- 6) 모델을 이용하여 예측해야 하는 수질 항목이 정형화되지 못하여 실제로 수질 영향평가에서 주요하게 다루어야 하는 수질 항목이 예측되지 않고 있다. 또한 모델에서 이루어지는 수질 반응은 여러 가지 수질항목이 연계하여 이루어지나 모델적용시 이를 고려하지 않고 있다.
- 7) 사업으로 인하여 대상수계에서 나타날 수 있는 최악의 수질 상태를 모델로 예측하여야 하나 적절한 예측 조건을 고려하지 못하며 예측에 일관성이 없다.
- 8) 모든 평가서에서 수질에 미치는 영향을 최소화하기 위해 저감방안이 제시되고 있었으나 제시된 방안에 따른 개선효과를 정량적으로

분석하지 않고 있다.

이러한 문제점들은 빠른 시일 내에 개선되어야 할 것으로 판단된다. 특히 수질예측에서 오염부하량만 산정하고 수용수체 내에서 일어나는 수질변화를 예측하지 않는 것은 영향평가의 기본 원칙에서 크게 벗어나는 것으로 사료된다. 이러한 문제점들을 개선하기 위해서는 평가 방법론 개발에 관한 연구와 평가자의 모델 교육이 필요한 것으로 판단된다. 또한, 평가 사업이 위치한 수계와 사업의 특성에 적합한 모델을 선정하고 이를 적용하는데 필요한 지침을 제시해 주어야 할 것으로 판단된다. 아울러, 영향 예측시 대상 수계와 사업특성에 따라 예측되어야 할 항목을 정형화하는 것이 필요할 것으로 사료된다. 예를 들어, 인공댐 건설시 계절에 따른 조류의 성장과 수직 수온 및 용존산소 분포 그리고 조화현상 발생가능성 등을 예측항목으로 지정하고 공단 개발시 유독성화학물질 유출가능성 등은 평가항목으로 정형화하여야 할 것으로 판단된다.

모델을 보정하고 검증하는 방법을 제시해 주고 이때 필요한 현장자료를 조사하는 기준을 설정해주는 것이 필요할 것으로 사료된다. 또한, 대상 수계에 대하여 보정 및 검증이 완료된 모델을 이용하여 영향 예측을 실시할 때 여분의 안정도를 고려하여 예측 조건을 제시해 주며 저감 대책에 따른 악영향 개선효과를 분석하는 것도 영향평가시 의무화하여야 할 사항으로 판단된다.

사업 시행 후 예상되는 생활하수나 공장폐수와 같은 점오염원의 부하량 산정을 위하여 사업특성에 따라 원단위를 표준화하여야 할 것으로 사료된다. 또한 공사시 강우현상으로 인하여 지면으로부터 유출되는 토사와 이용시 비점오염물질의 유출량을 산정하기 위하여 현재 사용하는 방법은 비과학적이며 이를 개선하기 위한 새로운 방법이 제시되어야 한다.

IV. 활용가능모델

수체 내에서 일어나는 수질변화 현상을 정량적으로 시뮬레이션하기 위하여 지금까지 여러 종류의 모델들이 개발되어 왔다. 1970년대 초 미국에서 DOSAG과 QUALI을 시작으로 전산모델이 개발되었으며, 1980년대 PC가 일반화되고 고성능화되면서 전산모델은 급속히 발달하였다. 지금까지 개발된 모델중 현재 신뢰성이 인정되어 널리 사용되고 있으며 환경영향평가에 유용하게 사용될 수 있는 모델을 정리하면 <표 2>과 같으며, 각 모델별 특성을 다음에 기술하였다.

1. QUAL2E

QUAL2E^{4),8)}는 1985년에 미국연방환경보호청(USEPA)에 의해 개발된 하천수질모델로서 현재 전세계적으로 가장 널리 사용되고 있는 수질모델이다. 이 모델은 1차원 운반확산식에 기초한 수치모델로 점오염원과 비점오염원 유입에 따른 하류방향의 수질변화를 예측할 수 있다. 정상상태를 가정하나 일변화에 따른 수질(온도, DO)의 변화를 시변화 상태로 모델할 수 있다. 예측 가능한 수질항목은 용존산소, 생물학적 산소요구량, 엽록소 a, 유기질소, 암모니아성 질소, 아질산성 질소, 질산성질소, 유기인, 용존인, 분변성 세균, 비보전성 물질 3가지, 보존성 물질 2가지-총 15개 항목으로 이용하는 목적에 따라 선택적으로 사용이 가능하다. 또한, 여러 개의 지천을 동시에 시뮬레이션 할 수 있는 장점이 있다.

2. STREAM

STREAM(Segment Travel River Ecosystem Autograph Model)^{3),4)}은 한국과학재단의 지원으로 1989년부터 박과 이에 의해 개발된 하천 수질모델로 경사가 비교적 급하고 하천거리가 짧은 지

표 2. 적용 가능한 수질모델

모델명	개발 지원기관	구분	특 성
QUAL2E	미연방환경청	하천	DO, BOD, Chl-a, N-Series(4가지), P-Series(2가지), 비보존성물질(3가지), 보존성물질(2가지) 총 15가지 항목에 대해 예측가능한 1차원 모델
KQUAL97	한국환경정책·평가연구원	하천	DO, BOD, Chl-a, N-Series(4가지), P-Series(2가지), 비보존성물질(3가지), 보존성물질(2가지) 총 15가지 항목에 대해 예측 가능한 1차원 모델로서 특히 우리 나라 대형하천에 적용가능
WASP5	미연방환경청	하천, 호수, 하구 등	DO, BOD, 온도, N-Series, P-Series, 독성유기화합물, 중금속, 대장균, 조류농도에 대해 예측 가능한 2차원 또는 3차원 모델
WQRRS	미공병단	호수	어류, 동물성 플랑크톤, 식물성 플랑크톤, 유기성 퇴적물질, COD, N-series, pH 등에 대해 예측 가능한 연직 1차원 모델
HSPF	미연방환경청	하천	보존성 물질, 수온, DO, BOD, pH, 유기질소, 유기인, 유기탄소 등에 대해 예측 가능한 1차원 모델, 유역모델 기능 포함
STREAM	한국과학재단	하천	DO, BOD, 분변성 세균, N-Series, P-Series, 비보존성 물질(3가지), 보존성 물질(2가지)에 대해 예측 가능한 1차원 모델으로 특히 유속이 빠르고 경사가 큰 산지형 소형지천에 적합한 모델
CE-QUAL-W2	미공병단	호수, 하구	온도, 염분도, SS, DOM, DO, algae, 인, 질소 등 총 19가지에 대해 예측 가능한 횡-종방향의 2차원 모델
RMA-4	미공병단	하천, 하구	1차 반응 항목에 대한 수평 2차원 확산 모델, 조석조류와 수리현상을 고려할 수 있음

천에 비교적 쉽게 적용할 수 있다. 이 모델은 반응조 나열법(Cell-In-Series)을 기초로 개발되어 확산계수에 대한 보정이 필요없으며, 모델에 그래픽이 부착되어 사용이 매우 간편하다. 수질반응 기작은 QUAL2E와 유사하게 이루어졌으나 부착 식물에 의한 용존산소 변화를 포함하고 있다는 장점이 있다. 정상상태를 가정한 1차원적 모델이며 예측 가능한 수질항목은 용존산소, 생물화학적 산소요구량, 엽록소 a, 유기질소, 암모니아성 질소, 아질산성 질소, 질산성 질소, 유기인, 용존 인, 분변성 세균, 비보존성 물질 3가지, 보존성 물질 2가지이다.

3. KQUAL97

KQUAL97^{4),5)}은 미국연방환경보호청에서 개발한 QUAL2E모델을 국내 대형 하천에 적합하도록 환경정책평가연구원의 지원으로 1997년 박과

이에 의해 개발되었다. 모델의 입·출력자료와 기본구성은 QUAL2E와 동일하며, 지배방정식 또한 일차원 이류 확산식으로 QUAL2E와 같으나 하천거리가 수백 km에 해당하고, 유입 지천이 수십개에 해당하는 대형하천에서의 수질변화도 동시에 시뮬레이션 할 수 있는 장점이 있다. 또한 QUAL2E에 비해 하천 내부 생성에 따른 유기물 증가나 탈질화와 같은 수질변화 기작이 포함되어 있다.

4. WASP5

WASP(Water Quality Simulation Program)^{2),15)}은 1981년 DiToro 등에 의해 미국 연방환경보호청에서 처음 개발되었으며, 수정과 보완을 거쳐 1993년 수체내 독성물질 거동까지 분석 가능한 WASP5 모형으로 발전되어 왔다. WASP5는 수체와 퇴적물을 포함하는 모델이며, 유한구획법

(Finite Segment Method)에 기초하고 있다. 이 모델은 하천, 강, 호수, 하구 등 여러 형태의 수체에 적용가능하며, 정상상태를 기본으로 하나, 시간에 따른 수질변화도 예측할 수 있다. WASP5는 일반수질(DO, BOD, 영양물질)과 독성물질(유기화합물질, 금속 등)에 대한 부모델인 EUTRO5와 TOXI5로 구성되어 있으며, 각 구획간 수체 이동량을 산정하는 DYNHYD5도 포함하고 있다.

5. WQRRS

WQRRS(Water Quality for River-Reservoir System)¹⁴⁾는 1978년 미국 육군 공병단의 수공학 센터(HEC: Hydrology Engineering Center)에 의해 개발된 호수 수질 모델이다. 이 모델은 정상상태와 비정상상태에서 수리 및 수질계산이 가능하며, 월별 수질 시뮬레이션은 가능하나 일별, 또는 계절별 시뮬레이션은 어렵다. 예측 가능한 수질 항목은 어류, 부착성 동물, 동물성 플랑크톤, 식물성 플랑크톤, detritus, 유기성 퇴적물질, 무기성 SS, 무기성 퇴적물질, 용존성 인, 총 무기성 탄소, 용존 암모니아성 질소, 용존 질산성 질소, 용존 아질산성 질소, 용존 생화학적 산소, 분변성 박테리아, 총 알카리도, 총 용해성 고형물질, pH 등 총 21가지이다. 호수는 수평방향으로 구획을 구분하고 각 구획의 수체는 완전혼합되어 균일한 수질을 유지하며 연직방향으로만 유속과 확산에 의한 수체이동으로 수질변화가 일어난다고 가정하는 1차원 모델이다. 연직 1차원 모델이기 때문에 좁고 긴 수로로 이루어진 우리 나라 다목적댐에 적용하기는 부적합하다.

6. HSPF

HSPF(Hydrological Simulation Program-FORTRAN)⁷⁾는 미환경청(EPA)에 의해 1980년에 개발되었으며, 1997년에 Version 11.0 까지 개선되어 왔다. 강우로 인한 비점오염물질 유출과정

을 하천내의 수리와 퇴적물-화합물질 상호작용과 결합시켜 시뮬레이션할 수 있는 유역모델과 하천 모델이 결합된 형태를 취하고 있다. HSPF는 1차원적 해석을 통해 하천유역의 수문학적 특성과 수질을 동시에 시뮬레이션할 수 있다. 시뮬레이션 가능한 수질 항목은 보존성물질, 수온, 무기성 퇴적물(세가지 퇴적물 유형: 모래, 실트, 진흙), DO, BOD, 무기질소(암모니아성 질소, 질산성질소, 아질산성질소), 무기인(인산), 플랑크톤(식물성 플랑크톤, 동물성 플랑크톤, 저서조류), 유기성 질소, 유기인, 유기탄소, pH, 무기성 탄소(CO₂, 총 무기성 탄소), 알칼리도이다. 모델 적용 결과, 강우로 인한 유출 유량과 퇴적물 부하량, 영양물질과 농약 농도의 시간적 변화, 유역의 어떤 지점에서 수질과 수량의 시간적 변화 등을 얻을 수 있다. 적용 범위가 큰 모델이나 너무 많은 입력 자료를 필요로 하는 단점이 있다.

7. CE-QUAL-W2

CE-QUAL-W^{29,16,17,18)}는 1974년 미공병단(U.S. Army Corps of Engineers)에서 개발된 수직 2차원 수질 모델이다. 이 모델은 하천에 댐을 설치하여 생긴 폭이 좁고 수심이 깊은 인공 호수에 매우 적합하며 온도, 염분도, 부유물질, 박테리아, 용존 유기물, 조류, 용존산소, 영양염류 등 19개의 수질 항목을 시뮬레이션 할 수 있다. 폭방향으로 균일한 수질을 가정하며 수심과 상하류 방향으로 수질변화를 표현한다. 또한 수지형으로 유입되는 지류를 포함할 수 있으며 호수내 물순환과 수직 수온분포를 잘 시뮬레이션 할 수 있는 장점이 있다. 인공댐 설치로 형성된 국내 대형 호수나 하구 연에 의한 호수 등의 부영양화나 수온 분포 예측에 매우 적합하다.

8. RMA-4

RMA-4¹⁰⁾는 1973년 미국공병단(U.S. Army

Corps of Engineers)에서 하천 및 하구의 유속분포 및 수질변화를 예측하기 위해 RMA-2와 함께 개발되어진 수질모델이다. RMA-4는 x, y 방향으로 적분된 2차원 이류 및 확산식을 기본식으로 하며, 2차원 유한요소법을 기초로 정상상태 또는 동적 상태에서의 수질변화를 예측할 수 있도록 프로그램 되었다. RMA-4는 RMA-2의 유속벡터 결과를 이용하여 1차 독립반응물질의 확산과정을 시간에 따라 예측가능하다. 하천, 하구, 해양에서 토사 확산과정을 예측하는데 적합하다.

V. 사용지침

수질분야에서 모델적용시 이루어지는 일반적인 절차는 <그림 5>와 같다. 먼저, 기존에 개발되어 타당성을 인정받은 모델 중 예측하고자 하는 현상과 대상 수체의 특성에 적합한 모델을 선정하

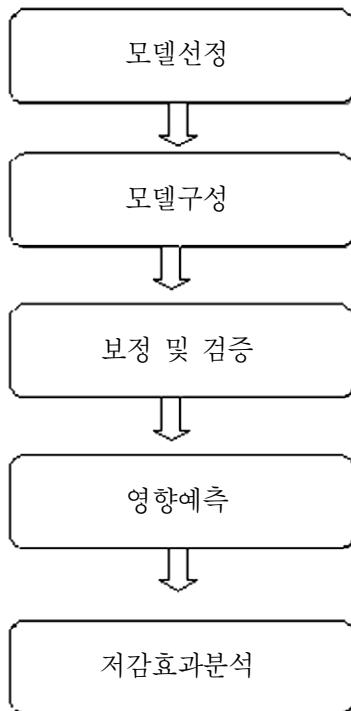


그림 5. 환경영향평가시 모델적용과정

여야 한다. 만약 지금까지 개발된 모델 중 대상수계와 예측하려는 현상에 적합한 모델이 없을 경우는 새롭게 개발하여야 한다. 다음으로는 모델의 조건에 적합하게 수계를 구획화하고 모델에서 요구되는 기본 입력자료를 결정하는 모델 구성과정을 거치게 된다.

모델의 선정과 구성단계가 끝나면, 대상 수계에서 나타나는 수질현상에 적합한 모델 계수를 결정하는 모델 보정 과정을 거치게 된다. 보정 과정에서는 현장에서 측정된 자료를 활용하게 된다. 다음으로 보정된 모델이 실제 현상을 적절히 나타내는지 검토하는 모델 검증 단계를 거치게 된다. 모델 검증을 위해서는 보정시 사용된 현장 측정자료와는 다른 시기에 측정된 현장 자료가 필요하게 된다. 보정 및 검증에서 사용되는 현장 측정자료는 수량과 수온 등에서 크게 차이가 나는 조건에서 조사된 자료가 적합하다. 보정과 검증이 완료된 후에는 사업으로 인한 공사시 및 이용시에 예상되는 수질조건을 모델에 입력하여 영향을 예측하게 된다. 일반적으로 대상수계에서 나타날 수 있는 최악 조건, 즉 최저 수량과 그때 나타날 수 있는 최고 수온을 모델에 가정하여 예측하여 실시하게 된다. 영향예측 결과 대상 수계에서 나타나는 악영향을 검토하게 된다. 예측된 수질이 대상수계의 수질기준치를 받아내는 경우 적절한 저감대책이 강구되어야 하고 저감대책에 따른 수질 개선 효과를 영향예측에서 사용한 모델을 이용하여 분석하게 된다. 대상 수체별 모델 적용 결과는 김 등¹⁾에 제시되어 있다.

1. 모델 선정

영향평가 대상 사업 중 하천 개발이나 인공댐 건설과 같이 수체의 형태를 변화시키는 몇몇 사업을 제외하면 대부분의 사업이 사업특성에 관계 없이 점오염원과 비점오염원을 포함하게 되며 오염물질이 배출되는 수체에 따라 영향이 달라진

다. 따라서 적용하는 수질 모델은 몇몇 사업을 제외하면 사업특성에 따라 구분되기보다는 적용하는 수체의 형태와 규모에 따라 구분하는 것이 필요하다.

하천개발 사업은 수체 내에서 발생하는 토사로 인한 부유물질의 농도변화 및 확산범위의 예측과 오타 방지막 설치와 같은 저감대책에 따른 수질 개선효과 분석이 가장 중요하다. 따라서 앞에서 설명한 RMA-4를 이용하는 것이 적절하다. 또한 하천에 인공댐을 건설하는 것은 정체현상에 따른 수화 현상(Algal Bloom)과 수심에 따른 수온변화 그리고 전도 현상(Turnover) 등을 야기시키고, 사업 전 수심이 얇고 물의 흐름이 있던 하천에 비해 전혀 다른 수질변화가 나타나게 된다. 이러한 현상을 예측할 수 있는 모델로는 앞에서 설명한 CE-QUAL-W2가 가장 적합한 것으로 판단된다.

그 외 대부분의 사업들은 사업 특성보다 수용 수체에 주안점을 두어야 하며 하천의 경우 QUAL2E 모델이 적합하며 수심이 깊지 않은 호수나 하구는 WASP5가 적합하다. 대상 하천이 소규모이고 경사가 급하며 부착 조류나 수초와 같이 고착성 식물에 의한 광합성에 의한 영향을 볼 경우는 국내에서 개발된 STREAM이 적합하다. 또한 대상 수계에서 영향권에 해당하는 하천의 길이가 수백 km 달하고 조류에 의한 내부원이 수질변화에 중요한 역할을 하는 하천에서는 KQUAL97 모델이 수체 내에서 일어나는 수질변화를 적절히 시뮬레이션 할 수 있다. QUAL2E나 STREAM 그리고 KQUAL97 등은 현재 GUI가 개발되어 비교적 쉽게 모델 적용이 이루어질 수 있다. HSPF는 유역에서 발생하는 비점오염물질을 비교적 잘 시뮬레이션 할 수 있는 장점이 있기 때문에 비점오염원이 하천 수질에 매우 중요한 역할을 하는 사업에 적합하다. 그러나 방대한 입력자료를 필요로 하기 때문에 자료조사가 충분히 이루어지지 않은 수계에서는 적용이 매우 어렵다.

2. 모델 구성

선정된 수질모델을 대상 수체에 적용하기 위하여 모델 구성과정이 선행되어야 한다. 모델 구성 과정에서 수체를 동일한 수리 현상과 수질반응 기작을 갖는 구간으로 나누고 다시 계산요소로 나누어 모델에 적합한 입력 자료를 작성한다. 또한 수체로 유입되는 점오염원과 비점오염원을 파악하고 수계 내에서 일어나는 물수지를 확인하는 과정을 거치게 된다.

3. 보정 및 검증

모델 구성과정이 끝나면 대상 수체에서 측정된 수질 자료를 이용하여 모델 보정과 검증을 실시한다. 수리수문모델과는 달리 수질모델은 생물화학적 반응기작이 수질 결정에 주요한 영향을 미치기 때문에 측정자료를 이용한 모델 보정과 검증이 매우 중요하다. 즉 보정과 검증을 거치지 않고 장래 수질 예측을 할 경우 예측값에 대한 신뢰성을 크게 떨어진다. 수질모델에 요구되는 입력자료로는 수체의 특징을 나타내는 자료와 수질 반응계수, 수리학적 입력계수 등이다. 보정시에는 모델하고자 하는 수질항목에 대한 예측값이 실측값을 잘 재현하도록 수질 반응계수를 조정한다. 보정이 완료되면 보정시에 사용되지 않았던 다른 입력자료 즉 유입지천의 유량과 수질 또는 오염 부하량, 분류 수질 등의 자료를 이용하여 모델을 검증한다. 모델 보정과 검증에 사용되는 실측자료는 오랜기간 동안 연속적으로 측정된 자료가 좋으나 측정에 드는 경비와 인력 등을 고려하여 일반적으로 3일 연속 측정하며 수량이 적은 기간을 택하여 측정하는 것이 좋다. 또한 모델에 포함되어야 하는 수량과 수질을 동시에 측정하여야 한다.

4. 영향예측 및 저감효과 분석

보정과 검증과정을 거친 모델을 이용하여 공사시와 이용시의 수질 변화를 예측하게 된다. 수질 변화 예측을 위해서는 공사시와 이용시에 발생하는 오염물질을 산정하여 모델에 입력하여야 한다. 대상 수계에서 나타날 수 있는 최저 수량과 그 때 나타나는 수온으로 최악의 경우를 가정하여 예측하기도 하며, 예측시 수량과 수온 조건을 수기별로 구분하여 예측하기도 한다. 예측 결과를 수질기준치와 비교하여 사업으로 인한 영향정도를 검토하고 저감대책 필요여부를 결정한다. 사업시행으로 인한 주변 수계의 수질이 악화될 것으로 예측되면, 이러한 악영향을 최소화시키기 위한 저감대책이 필요하며 각 대책에 따른 수질 개선효과를 예측시 사용한 모델을 이용하여 분석할 수 있다.

VI. 결론

최근 국내에서 보고된 환경영향평가서에 제시된 수질 모델 활용에 관하여 검토해 본 결과 여러 가지 문제점이 나타나고 있었다. 수질변화는 환경영향평가 제도의 대상이 되는 거의 모든 사업에서 나타나고 있다. 공사시에는 강우로 인한 토사 유출이 발생하고 이용시에는 생활하수나 사업 폐수가 하천이나 호수로 유입되어 수질을 악화시키게 된다. 또한 이용시에 직접적인 오염원의 증가가 없는 경우라도 하천에서 댐건설이나 모래자갈 채취와 같은 사업은 수체 흐름을 정체시켜 수질변화를 야기하기도 한다. 수환경에 미치는 이러한 환경영향요소로 인하여 대부분의 사업에서 평가가 이루어지고 있으나 모델을 이용한 예측은 극히 드물게 이루어지고 있다. 모델을 사용하는 경우도 보정과 검증과정을 거치지 않고 있으며 예측조건의 결여로 예측 사항에 대한 신

뢰성이 없었다. 이러한 문제점들을 개선하기 위해서는 과학적인 영향예측 방법들이 제시되어야 하며 지금까지 개발되어 온 수질 모델을 대상 수계와 사업 특성에 적절하게 선정하여 적용하는 것이 필요하다. 또한 모델을 보정하고 검증하는 방법을 제시해 주고 영향 예측시 예측 조건을 제시해 주며 저감 효과 분석도 영향평가지 의무화하여야 할 사항으로 판단된다.

사 사

본 연구는 환경정책·평가연구원의 지원으로 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 김석철 외 6인, 1998, 사업특성별 환경영향평가를 위한 모델의 비교연구, 한국환경정책·평가연구원.
2. 류병로, 1997, 호소수질 모델(RBOX와 WASP 등)의 호소수질 모의 모델에 대한 이론 및 적용, 수질모델 Workshop Proceeding, 한국수자원공사, 수자원연구소.
3. 박석순, 이용석, 1993, 하천 모델 STREAM과 STRESS 개요 및 사용지침서.
4. 박석순, 1997, 하천 수질 모델의 원리와 활용 방법, 수질모델 Workshop Proceeding, 한국수자원공사, 수자원연구소.
5. 박석순, 이용석, 1999, 대형 수계 관리를 위한 수질 모델의 개발과 적용, 대한환경공학회지, 21(10): 1837-1848.
6. 박석순, 나은혜, 2000, 환경영향평가에 사용되는 컴퓨터 모델에 관한 연구 II : 수리수문 모델, 환경영향평가학회지 9(1): 25-37.
7. Anthony S.D. Jr., et. al., 1984, Application Guide for Hydrological Simulation Program-FORTRAN(HSPF), Report EPA/600/3-

- 84/065, U.S. Environmental Protection Agency, Athens, GA..
8. Brown, L. and Barnwell, T. O. Jr., 1987, The Enhanced Stream Water Quality Models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: Documentation and User Manual, Report EPA/600/3-87/007, U.S. Environmental Protection Agency, Athens, GA.
 9. Cole, R.W., et. al., 1995, CE-QUAL-W2: A two-dimensional, laterally averaged, hydrodynamic and water quality model. Version 2.0, Instructional Report EL-95-1. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
 10. Environmental Modeling System Inc., 1998, Hydrodynamic Modeling with SMS, Orlando, Florida.
 11. Rau, J.G. and Wooten, D.C., 1980, Environmental Impact Analysis Handbook, McGraw-Hill, Inc.
 12. Canter, L.W., 1996, Environmental Impact Assessment, McGraw-Hill, Inc.
 13. Robert, B. A. Jr., et. al., 1988, WASP4, A Hydrodynamic and Water Quality Model - Model Theory, User's Manual, and Programmer's Guide, Report EPA/600/3-87/039, U.S. Environmental Protection Agency, Athens, GA.
 14. U.S. Army Corps of Engineers, 1978, WQRRS Water Quality for River-Reservoir Systems User's Manual.
 15. Westman, W.E., 1985, Ecology, Impact Assessment, and Environmental Planning, John Wiley & Sons, Inc.
 16. <http://www.cee.odu.edu/cee/model/cequal.html>, CEE/ODU Civil/Environmental Model Library: CE-QUAL-R1/CE-THERM-R1 Model: A Numerical One-Dimensional Model of Reservoir Water Quality
 17. <http://www.wes.army.mil/el/elmodels/w2info.html>, CE-QUAL-W2: A hydrodynamic and Water quality model for rivers, estuaries, lakes, and reservoirs
 18. <http://www.navpoint.com/~jeai/cequalw2p1.html>, CE-QUAL-W2 Model Description