환경영향평가에 사용되는 컴퓨터 모델에 관한 연구 II : 수리수문 모델

박석순 · 나은혜
이화여자대학교 공과대학 환경학과

A Study of Computer Models Used in Environmental Impact Assessment II : Hydrologic and Hydraulic Models

Park, Seok-Soon · Na, Eun-Hye
Department of Environmental Science and Engineering, Ewha Womans University

Abstract

This paper presents a study of hydrological and hydraulic model applications in environmental impact statements which were submitted during recent years in Korea. In many cases (almost 70 %), the hydrological and hydraulic changes were neglected from the impact identification processes, even if the proposed actions would cause significant impacts on those environmental items. In most cases where the hydrological and hydraulic impacts were predicted, simple equations were used as an impact prediction tool. Computer models were used in very few cases(5%). Even in these few cases, models were improperly applied and thus the predicted impacts would not be reliable. The improper applications and the impact neglections are attributed to the fact that there are no available model application guidelines as well as no requirements by the review agency. 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 presented in this paper. This study suggested that the model application should be required and guided in detail by the review agency. It is also suggested that the hydrological and hydraulic items shoud be integrated with the water quality predictions in future, since the non-point source pollution runoff is based on the hydrologic phenomena and the water quality reactions on the hydraulic nature.

Keyword: Environmental Impact Assessment, Hydrological Models, Hydraulic Models

I. 서 론

지면에서 이루어지는 대부분의 개발 사업들은 유역의 투수성과 오염 발생원을 변화시켜 수계내 수리수문 현상에 매우 중요한 영향을 미친다. 예를 들어 도시개발이나 공업단지 조성 등은 초지나 임야 같은 투수지면을 아스팔트나 콘크리트와 같은 불투수지면으로 변화시키기도 하며, 수자원 개발이나 하천 개발과 같은 사업들은 수체의 크기나 유속의 방향과 세기를 변화시킬 수도 있다. 이러한 수리수문변화는 강우시 하천수량을 기존 통수량보다 크게 증가시켜 하천을 범람시키기도 하며 갈수기시 하천수량을 유지수량보다 적게 감소시키고, 침식과 퇴적 형태를 변하게 하여 하천 생태계나 수질에 심각한 영향을 미치기도 한다.

국내에서 환경영향평가가 처음 실시된 이후 생활환경의 수질분야에서 수환경에 미치는 영향을 포괄적으로 다루어오다 1994년 환경영향평가법이 제정된 이후부터 수리수문 분야가 자연환경의 평가 항목으로 분류되어 영향평가가 독립적으로 이루어지고 있다. 수리수문변화는 대상 수계와 현상에 적절하게 개발된 수식과 전산 모델을 이용하여 비교적 정확하게 예측할 수 있다. 또한 예측된 악영향을 최소화할 수 있는 저감대책을 설정하여 이에 따른 저감효과를 분석하고 경제적이고 기술적으로 가능한 최적안을 선정하는데 매우 유용하게 사용될 수 있다. 특히 최근에는 고성능 PC가 일반화되면서 사용이 쉽고 예측력이 크게 향상된 전산 모델들이 개발되어져 고도의 모델 전문기술이 없이도 신뢰성 있는 예측이 가능해졌다.

본 논문에서는 최근 국내에서 실시된 환경영향평가서를 검토하여 수리수문분야의 모델 활용을 검토하고 사용시 문제점과 개선방안을 제시하고자 한다. 또한 대상 수계와 사업 특성과 따라 모델 선정과 적용 지침을 제시하고 표준화된 모델 적용 예를 개발하여 제시함으로 장래 환경영향평가 기술을 향상시키고자 한다.

Ⅱ. 적용 현황

1. 검토 대상

현재 국내에서 환경영향평가시 수리수문 분야에서 이루어지고 있는 평가방법과 모델 적용현황을 파악하기 위하여 1997년 7월부터 1998년 10일까지 환경정책평가연구원에 접수된 194건의 평가서를 검토하였다. 검토한 평가서들은 도로건설, 도시개발, 항만건설, 관광단지조성, 댐건설, 하천이용 등 우리나라 환경영향평가제도에서 다루는 대부분의 사업들을 포함하고 있어 본 연구의 목적에 적절한 것으로 판단되었다. 도로건설이 전체의 41.2%(80건)로 가장 많았으며 다음이 도시개발, 항만건설, 관광단지 조성사업 등의 순서로 이루어져 있었다.

수용 수체별로 분류하면 하천이 전체의 68.0%(132건)에 해당하였으며 항만 건설이나 해안 매립과 같이 해양만을 대상으로 시행되는 사업이 19.1%(37건)인 것으로 조사되었다. 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 하천이 평가 대상 환경인자로 나타나고 있었다. 검토한 평가서에 제시된 사업 특성과 수용수체에 관해서는 박과 나[2]에 기술되어 있다.

2. 평가방법 및 모델적용현황

검토 평가서 중 수리수문분야 평가 현황을 파악하기 위하여 평가서에서 수리수문분야 평가 항목 지정여부를 조사하였다. 조사 결과는 〈그림 1〉에 제시하였다.

그림에서 보듯이 검토 평가서(194건) 중 수리수문 분야를 평가항목으로 지정하고 있지 않은 건수는 68.6%(133건)에 해당하였다.

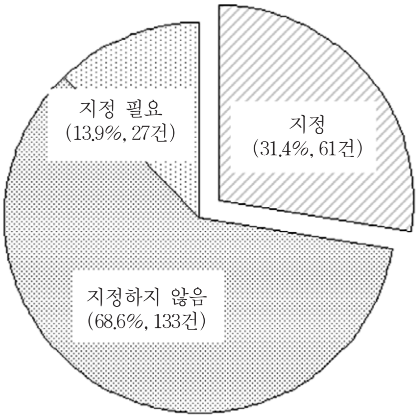
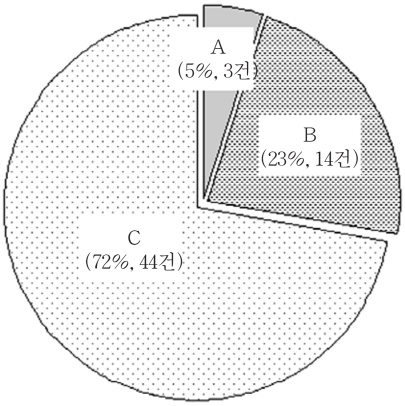


그림 1. 수리수문 분야 평가항목 지정여부



주) A : 전산모델을 이용한 영향예측
B : 수식을 이용한 영향예측
C : 전문가의 견해를 통한 영향예측

그림 2. 수리수문 분야 영향예측방법

앞에서도 기술하였듯이 넓은 지역에서 토지이용도를 변화시키는 사업이나 수체 크기나 흐름을 변화시키는 사업은 수리수문현상에 매우 중요한 영향을 미친다. 도시나 공단 개발 그리고 하천 개발이나 댐건설과 같은 사업이 여기에 해당하며 그 외 많은 사업들이 수리수문 현상에 미칠 영향 요소를 포함하고 있다. 그러나 검토한 평가서 중 수리수문에 대한 평가가 필요함에도 불구하고 평가항목으로 지정하지 않은 건수가 13.9%(27건)에 이르는 것으로 조사되었다.

수리수문분야 영향예측을 위해 사용하고 있는 방법을 검토하기 위하여 수리수문 분야를 평가항목으로 지정한 평가서(61건)를 대상으로 예측방법을 조사하였다. 〈그림 2〉에 제시한 조사 결과를 보면 사업시행으로 인해 야기되는 영향에 대해 전문가의 의견을 제시하는 수준에 그치는 경우가 조사대상(61건)의 72%(44건)에 이르는 것으로 나타났다. 그 외 합리식이나 Mononobe 강우분포식 그리고 Nakayasu 종합단위도법 또는 Kerby 도달식과 같은 수식을 사용한 건수는 23%(14건)에 해당하였다. 그리고 전산모델을 이용한 경우는 5%(3건)에 불과하였다.

전산모델을 사용한 평가서의 사업 분야는 〈표 1〉에 제시하였듯이 댐건설과 매립사업 그리고 도로건설이었으며 적용된 모델은 미국 공병단(U. S Army Corps of Engineers)에서 개발한 HEC-1(수문모델)과 HEC-2(수리모델)이다.

III. 문제점 및 개선방안

평가서에 기술된 수리수문 분야를 예측 방법과 적용 모델을 중심으로 검토해본 결과 여러 가지 문제점이 나타나고 있는 것을 알 수 있었다. 앞에서 설명하였듯이 대부분의 평가 대상사업은 수리

표 1. 영향평가에 사용된 수리수문모델

모델명	사용건수	사업명(작성년도)	사업분야	대상수계
HEC-1	2/3	영월다목적댐 건설사업 (97.4)	댐건설	하천 및 호수
		마동지구 농어촌용수개발사업 (97.11)	매립 및 개간	하천 및 해양
HEC-2	1/3	전주시 관내 국도대체도로 건설사업 (98.2)	도로건설	하천

수문현상에 매우 중요한 영향을 미친다. 그러나 검토한 대부분의 평가서에서는 특별한 경우를 제외하고 수리수문을 평가항목으로 선정하지 않고 있다. 또한 평가항목으로 선정한 경우에도 과학적이고 정량적인 예측을 위한 전산 모델 적용은 극히 드물게 이루어지고 있다. 검토한 평가서를 기준으로 수리수문 분야에서 다음과 같은 문제점들이 지적되어질 수 있다.

1) 대상 사업이 수리수문 현상에 미치는 환경영향요소를 적절히 파악하지 못하고 있다. 예를 들어 개발로 인하여 넓은 지역에서 지면의 투수도가 변화되는 사업에서도 평가항목으로 선정되지 않고 있다. 대부분의 개발사업이 기존의 투수면을 불투수면으로 변화시켜 강우시 하천으로 유입되는 수량을 증가시키고 이는 곧 하천의 수리현상을 변화시킨다.
2) 모델을 사용하면 사업이 수리수문 현상에 미치는 영향을 정확하고 정량적으로 예측할 수 있는 사업이 대부분이었으나 극히 제한된 평가서에서 모델 사용이 이루어졌다.
3) 대상 수계와 사업의 특성에 적절한 모델이 선정되어 사용되어야 하나 특성에 적합한 모델이 선정되지 못하고 있다.
4) 모델 적용시 대상 수계에 적절하게 모델계수가 보정되고 검증되어야 하나 보정 및 검증 과정을 거치지 않고 있으며 이로 인하여 예측 결과에 대한 신뢰도가 부족하다.
5) 모델을 사용하여 예측하는 사항이 정형화되지 못하여 실제로 영향평가의 수리수문에서 검토되어야 하는 사항을 예측하지 않고 있다.
6) 모델을 이용하여 대상수계에서 나타날 수 있는 최악의 수리수문 상태를 예측하여야 하나 예측에 필요한 조건이 주어지지 않고 있기 때문에 이를 예측하지 못하며 예측에 일관성이 없다.
7) 저감대책에 따른 효과분석이 이루어지지 않고 있기 때문에 제시된 저감대책이 어느 정도 실효가 있는지, 기술적 또는 경제적으로 어떤 방안이 최적안인지 검토없이 저감대책이 제시되고 있다.

검토한 영향평가서에 나타난 이러한 문제점들은 가까운 시일 내에 반드시 개선되어야 할 것으로 판단된다. 특히 예상되는 수리수문 영향을 무시하고 평가항목으로 지정하지 않는 점이 개선되어야 하며 영향 예측항목을 정형화하는 것이 필요할 것으로 사료된다. 그 외 여러가지 개선방안들이 박과 나[2]에 기술되어 있다. 비점오염물질 산정을 위하여 최근 널리 활용되고 있는 유역모델을 사용하는 것이 가장 좋은 방법이다. 유역모델은 강우시 수문곡선(Hydrograph)과 오염부하량곡선(Pollutograph)를 동시에 계산할 수 있기 때문에 비점오염원 부하량 산정 뿐만아니라 수문변화 예측에도 좋은 도구로 사용될 수 있다. 특히 골프장이나 스키장 개발과 같이 지면에서 유출되는 비료나 농약이 가장 중요한 영향요소일 경우 유역모델 사용이 요구된다.

유역에서 일어나는 비점오염물질 유출을 시뮬레이션하기 위해서는 수문현상을 고려해야 하고 하천이나 호수와 같은 수용수체의 수질변화를 모델하는 것은 수체 내에서 일어나는 수리현상에 기초하게 된다. 이러한 이유로 유역모델과 수질모델은, 독립된 수리모델과 수문모델에 비해 정밀도에서 다소 차이가 있을 수 있으나, 각각 수문현상과 수리현상을 포함하고 있다. 영향평가에서 이러한 모델들이 효과적으로 사용되기 위해서는 수리수문과 수질분야가 하나의 수환경 분야로 통합되고 유역과 수용수체에서 일어나는 영향을 유역모델과 수질모델로 예측하고 특별한 경우 독립된 수문모델과 수리모델이 선택적으로 사용하는 것이 좋을 것으로 사료된다.

최근 유역의 지형이나 토지이용도 그리고 오염원과 환경기초시설 등을 포함하는 GIS(지리정보시스템)와 유역모델 그리고 수용수체의 수질모델을 통합하여 하나의 수계관리 시스템으로 개발하

려는 시도가 이루어지고 있다. 이러한 수계관리 시스템이 빠른 시일 내에 실용화되어 유역에서 일어나는 개발사이 수환경에 미치는 여러 종류의 영향을 정확하고 정량적으로 예측할 수 있게 되면 현재 수리수문과 수질 영향평가에서 나타나는 문제점들이 크게 개선될 것으로 기대된다.

Ⅳ. 활용가능모델

1. 수리수문 모델

사업으로 인하여 나타나는 주요 수리수문 변화는 강우시 지면에서 유출되는 수량변화와 하천의 유속변화를 들 수 있다. 이러한 변화는 전산 모델을 이용하여 비교적 쉽고 정확하게 예측되어질 수 있다. 지금까지 많은 종류의 전산모델이 개발되어져 왔으며 최근에는 모델 입력자료와 예측결과를 쉽게 작성하고 분석할 수 있는 프로그램(GUI: Graphic User Interface)까지 개발되어 사용이 매우 쉽게 되었다. 현재 예측의 정확성이 인정되어 널리 사용되고, 쉽게 사용될 수 있는 모델을 〈표 2〉에 정리하였으며 각 모델의 특성을 다음에 기술하였다.

1) HEC-1

HEC-1[3),8)]은 미국 공병단(US Army Corps of Engineers)의 HEC(Hydrologic Engineering Center)에서 유역에서의 강우-유출현상을 시뮬레이션하기 위하여 1967년에 처음 개발되었으며 그후 1990년까지 계속적인 수정이 이루어져 왔다. 또한 최근 많은 연구에 의해 유량 곡선분석 뿐만 아니라 댐 안정성 분석 및 홍수시 범람 예상구간 분석 그리고 연속적 강우유출량 예측 등 새로운 분석 기능이 첨가되었다. 모델 적용을 위해 대상 유역은 단위유역으로 구성된 시스템으로 표현되며, 각 단위 유역에는 지면 유출수 이동경로와 하천 수로 또는 호수를 표현할 수 있다. 강우-유출에 대한 분석과정은 강우, 침투 또는 차단(강우 손실), 유효 강우(초과 강우)의 유출, 기저 유량과의 합류, 유출량의 흐름으로 나눌 수 있으며, 각 과정에 대해 제공되는 적용식들을 분석 대상 지역의 특징에 따라 적절히 선택하여 사용할 수 있다. HEC-1에서 요구되는 입력자료는 유역 면적, 기저유량, 하천의 수심 등이며, 모델결과로 유역내 원하는 지점에서의 유량곡선을 얻을 수 있다.

2) TR-20

TR-20[3),7)]는 강우의 결과로 발생하는 직접적인

표 2. 적용 가능한 수리수문모델

모델명	개발기관	구분	특 성
HEC-1	HEC (USACE)	수문	Flood Package Program, 원하는 지점에서의 수문곡선 예측가능
TR-20	SCS & ARS	수문	강우유출과 하천 또는 호수를 통한 흐름으로부터 수문곡선, 원하는 단면 또는 구조물의 위치에서 강수시 최대유량, 강수발생시간, 수표면 높이 등을 계산가능.
NFF	USGS	수문	측정이 이루어지지 않은 지역에 대한 수량 정도와 빈도를 예측하기 위해 개발된 회귀식을 프로그램한 것, 최대 유량과 평균유량곡선을 예측할 수 있음.
HEC-2	HEC (USACE)	수리	하천에 적용되는 1차원 모델로 유속과 수표면의 변화 예측 가능.
FEMWMS-2DH	FHWA	수리	수평 2차원 모델로 유속과 수위 예측 가능, 유한요소법 사용
RMA-2	WES (USACE)	수리	수평 2차원 모델, 유속과 수위예측가능, 유한요소법 사용. 수질확산모델 RMA-4와 함께 사용

유출을 계산하기 위한 수문모델로 Hydrology Branch of Soil Conversation Service(SCS)와 Hydrology Laboratory of Agricultural Research Service(ARS)가 공동으로 개발하였으며, 개발 이래 SCS에 의해 계속적인 수정이 이루어져 왔다. TR-20을 이용하여 어떤 문제를 분석하고자 할 때에는 대상 유역을 수문학적으로 동일한 소유역으로 구분하여야 하며, 각 소유역에 대한 배수구역의 면적과 지연시간, curve number, 강우강도, 지류의 길이, 특정지점의 단면에 대한 자료, 각 구조물에 대한 높이와 저장능력 등의 자료가 기본적으로 필요하다. 시뮬레이션 결과, 유출과 하천 도는 호수를 통한 흐름으로부터 강우유량곡선은 얻을 수 있으며, 지류로부터 통합되어지거나 지류에 의해 분리되는 유량곡선을 얻을 수 있다. 또한 원하는 단면 또는 구조물의 위치에서 강우시 최대유량, 강우발생시간, 발생당시의 수표면 높이 등이 계산되어질 수 있다.

3) NFF

NFF(National Flood Frequency)[3),5)]는 측정이 이루어지지 않은 지역에서의 강우 정도와 빈도를 예측하기 위해 USGS(US Geological Survey)에 의해 제안한 회귀식을 Federal Highway Administration과 Federal Emergency Management Agency와 공동으로 개발하였다. 회귀식은 측정지역의 자료를 바탕으로 유역 및 기후와 유출수량간의 관계가 회귀분석을 통하여 결정되며, 이러한 관계를 바탕으로 유역과 기후의 특징에 대한 변수를 결정함으로써 측정이 이루어지지 않은 지역에 대해서도 유출수량 특징을 결정할 수 있다. 모델을 적용하기 위해서는 우선 측정지역에 대한 자료를 바탕으로 유역 및 기후특성과 유출수 특성간의 관계를 나타내는 회귀식의 계수를 결정하여야 한다. 여기서 유출수 특성이란 빈도에 따른 최대유량 및 지연시간이며, 유역 및 기후 특성이란 유역면적, 경사도, 강우강도, 유역의 개발정도 및 불투수면의 비율 등이 포함된다. 위와 같은 방법으로 얻어진 회귀선과 연구 대상지역의 변수를 결정해 줌으로써 대상지역에 대한 유출수 빈도에 따른 최대 유량과 평균 유량곡선을 예측할 수 있다.

4) HEC-2

HEC-2[10),15)]는 미국 공병단(US Army Corps of Engineers)의 HEC(Hydrologic Engineering Center)에서 개발한 수리모델로서 MENU2, EDIT2, PLOT2, SUMPO, COED 프로그램으로 구성되어 있는 Package의 형태이다. HEC-2는 하천의 수표면에 대한 단면도를 1차원적으로 계산 가능하며, 일정한 물의 흐름이나 점차 변화하는 흐름 상태에서도 가능하다. 단면에 대한 입력자료로서 굴착물 또는 구조물 등에 대한 자료가 요구되며, 모델의 적용 결과 하천의 단면도와 계산된 수표면의 단면도를 얻을 수 있다. PLOT2는 이러한 결과를 도표화할 수 있으며, SUMPO는 HEC-2의 결과를 표로 작성할 수 있다. 이 때 원하는 표만을 선택하여 출력할 수 있다.

5) FESWMS-2DH

FESWMS-2DH(Finite Element Surface-Water Modeling System: Two-Dimensional Flow in a Horizontal Plane)[9)]은 USGS의 U. S. Federal Highways Administration에 의해 개발된 수리모델로서, DINMOD, FLOMOD, ANOMOD으로 구성되어 있다. FLOMOD는 2차원적 흐름을 시뮬레이션하며, DINMOD는 FLOMOD에서 사용되는 2차원 유한요소망을 생성하는 전처리 프로그램이다. ANOMOD는 FLOMOD로부터 얻어진 결과를 도표화하는 후처리 프로그램으로 지하수위 또는 지표수위 등고선과 유속 등을 도표로 나타낼 수 있다. FEMWMS-2DH는 수표면에서 2차원적으로 흐르는 복잡한 흐름 상태를 시뮬레이션 할 수 있으며, 섬 주위의 흐름, 불규칙한 흐름, 교각을 통해 흐르는 흐름 등과 같이 다양한 흐름상태에서

적용될 수 있다.

6) RMA-2

RMA-2[4]는 1973년 미국 공병단(US Army Corps of Engineers)의 WES(Waterway Experimental Station)에서 처음 개발하여 지금까지 개선되어져 오고 있는 수리모델이다. 하천이나 호수의 수리현상 뿐만아니라 하구나 항만에서 조석조류변화까지 예측이 가능하다. 이 모델은 연속방정식과 운동방정식을 유한요소법으로 풀이한 2차원 모델으로, 모델 적용을 위해서는 x, y축 방향의 평균유속, 수심 등의 자료와 조도계수 등이 요구되다. 모델 결과 유속의 방향과 세기를 예측할 수 있다.

2. 유역모델

강우시 지면으로부터 유출되는 비점오염물질을 예측하기 위하여 지금까지 여러 종류의 유역모델들이 개발되어 왔다. 유역모델은 비점오염물질을 산정할 뿐만아니라 강우 유출수량을 동시에 시뮬레이션하기 때문에 유역모델을 적용할 경우 수문모델을 사용할 필요가 없다. 유역모델도 수리수문모델이나 수질모델과 같이 1970년대 미국을 중심으로 개발되기 시작하였으며, 모델에 따라 입력자료 요구도와 예측결과에 차이가 많다. 지금까지 개발된 모델 중 환경영향평가에 적용할 수 있는 유역모델을 정리하면 〈표 3〉와 같으며, 각 모델별 특성을 다음에 기술하였다.

1) AGNPS

AGNPS(Agricultural Non-Point Source Pollution Model)[6),11)]는 Minnesota Pollution Control Agency와 U.S.SCS의 협조로 U.S.Agricultural Research Service(ARS)가 개발한 유역모델로써 농경 유역으로부터 배출되는 비점오염원을 평가하고 다양한 유역관리방안의 효과를 비교하는데 이용될 수 있다. AGNPS는 강우-유출과정에 의해 유출된 오염물질이 유역의 최고지점에서 유역의 배출구까지 흘러가게 된다고 가정하고 있으며, 유역내의 모든 지점에서 유량과 수질을 예측할 수 있다. 예측 가능한 항목은 강우유출량, 영양물질, 토사, COD, 농약 등이며, 각 오염물질은 유출수 내에 용존된 상태와 유출된 토사에 부착된 상태로 나

표 3. 적용 가능한 유역모델

모델명	개발기관	강우형태	특 성
AGNPS	USDA	단일, 연속	영양물질, 농약, 토사, COD 등에 대해 예측 가능하며, 다양한 토지유형에 대해 처리 가능.
ANSWERS	Purdue University	단일	농경지의 유출현상을 예측, 토지 관리 및 보전정책에 대한 효과를 평가, 토사 및 영양물질 유출 예측
DR3M-QUAL	USGS	단일, 연속	토사, 질소와 인, 금속 그리고 유기물질에 대해 예측 가능, 처리시설, 저수력, 하수시스템에 대한 분석이 가능.
STORM	HEC	연속	부유물질, 침강성 고형물, BOD, 총 분변성 대장균, 정인산, 질소에 대해 예측 가능하며, 저수력, 처리시설에 대한 분석이 가능.
SWMM	EPA	연속	토사를 포함하여 10가지의 오염물질에 대해 예측 가능, 처리시설, 저수력, 하수시스템에 대한 분석이 가능.
SWRRBWQ	USGS	연속	토사, 질소, 인 그리고 농약에 대해 예측 가능.
CREAMS	USGS	단일, 연속	농약과 비료에 대한 화학물질모델이 있으며, 영양물질 모델은 농경지에서의 질소와 인의 순환 및 유실을 추정 가능.

누어 계산된다. 강우유출량 예측을 위해서는 SCS 유출곡선법과 단위수문곡선(Unit Hydrograph)를 이용하며, 토양유실량 예측을 위해 MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation)을 사용한다.

모델을 적용하기 위해 토양 특성 및 토지이용 형태, 지형자료, 기상자료, 점오염원 자료 등이 요구되며, 최근에는 지형자료의 자동 생성을 위해 GIS와의 연계가 가능하게 되었다.

2) ANSWERS

ANSWERS(Areal Non-point Source Watershed Environment Response Simulation)[6]은 미국 Purdue대학교에서 개발한 모델로써 농경지에서의 강우--유출현상에 대해 예측 가능하며, 농경 유역의 토지이용관리 및 보전정책에 대한 효과를 평가 가능하다. 이 모델은 강우에 의한 수문현상에 대해 예측 가능하고, 부유물질과 영양물질의 유출과정을 예측할 수 있으나 눈이 녹아 유출되는 과정과 농약에 대한 시뮬레이션이 불가능하다. 모델 적용을 위해서는 유역의 지형에 대한 상세한 자료와 토양 및 토지이용에 관한 자료가 유역요소별로 나누어 입력되어야 하며, 유량과 농도에 대한 출력결과가 각 요소별로 계산될 수 있다. ANSWERS는 입력 화일의 형태가 복잡하여 넓은 유역에 대한 분석을 위해서는 대형 컴퓨터가 필요하다는 단점이 있다.

3) DR3M-QUAL

DR3M(Distributed Routing Rainfall-Runoff Model)[6),14)]은 USGS에 의해 개발된 유역모델로 도시 지역에서의 발생하는 표면유출수와 오염부하에 대해 시뮬레이션이 가능하다. 이 모델은 수질에 영향을 미칠 수 있는 불투수지역, 투수강우자료를 이용하여 자연하천이나 인공수로를 통해 일어나는 유출의 흐름을 지역, 강우분포 등을 고려하여 시뮬레이션이 행해지며 토사, 질소와 인, 중금속 그리고 유기물질에 대해 예측이 가능하다. USLE식에 기초하여 토양유실을 계산하며 이 동과정은 플럭흐름을 가정하여 Lagragian Scheme를 사용한다.

4) STORM

STORM(Storage, Treatment, Overflow, Runoff Model)[6)]은 미육군공병단 Hydrologic Engineering Center에 의해 1975년에 개발된 모델로서, 도시 유역에서 발생하는 유출과정에 대해 시간단위의 연속적이 시뮬레이션이 가능하다.

이 모델은 준-동적 모델로서, 수정된 합리식을 사용하여 수문학적 과정을 시뮬레이션한다. 강우/유출 강도와 부피는 면적 가중 유출계수와 SCS 유출곡선지수법에 의해 계산되어지며, 침식에 대한 계산을 위해 USLE가 사용된다. 오염물 축적과 유실식으로 부유물질, BOD, 분변성 세균, 인과 질소의 농도를 시뮬레이션 할 수 있다. 모델 적용을 위해 SCS Curve Number, 오염물 축적과 유실과정에 대한 변수, 유출계수와 토양형 등에 대한 입력자료가 요구되며, 시간별 수문곡선과 오염물에 대한 농도-시간곡선을 얻을 수 있다.

5) SWMM

SWMM(Storm Water Management Model)[6),13)]은 미국연방환경보호청(USEPA)에 의해 개발된 모델로서, 도시 유역에서 강우에 의해 발생되는 수량과 수질을 시뮬레이션 할 수 있다. 이 모델은 수량과 수질과정의 다양한 범위에 적용하기 위해 몇 가지 모듈(module)과 블록(Block)으로 구성되어 있다. RUNOFF 부모델은 강우로부터 발생된 유역의 유출량과 문제지점까지 추적하여 수문곡선(Hydrograph)과 시간-농도 곡선(Pollutograph)을 제공한다. SWMM는 부유물질을 포함하여 10가지의 오염물질에 대해서만 시뮬레이션 할 수 있으며, 시뮬레이션을 위해 강우강도곡선(hyetograph), 토지이용형태, 토양의 특성, 수리학적 인자 등이 입력자료로 요구된다. 모델 적용 결과,

어느, 한 지점에서의 유량, 대상물질의 농도, 수위의 시간별 자료를 얻을 수 있다.

6) SWRRBWQ

SWRRBWQ(Simulation for Water Resources in Rural Basins-Water Quality)[6),12)]는 미농무성(USDOA)에 의해 개발된 모델로 농지 유역에서의 저수지의 저장고, 수문과정, 토사유출, 농약의 흐름 등을 시뮬레이션 할 수 있다. 토지이용형태와 기후, 토양의 특성, 지형 등의 차이를 설명하기 위하여 유역은 최대 10개의 소유역으로 나누어지며, 모델 적용을 위해서는 기상자료(일별 강우량, 복사량 등)와 토양, 토지이용 등에 대한 자료가 필요하다. 수정된 SCS 유출곡선지수법을 사용하여 유출량을 예측하며, 첨두유출율은 수정된 합리식을 이용한다. 시뮬레이션이 가능한 항목은 퇴적물, 질소, 인 그리고 농약이며, 오염물 이동은 용존 오염물과 부유물에 부착된 오염물로 나누어서 계산된다.

7) CREAMS

CREAMS(Chemical, Runoff and Erosion from Agricultural Management System)[6)]은 농경 유역의 최적 관리를 위해 미농무성에 의해 개발된 모델이다. 이 모델은 유출량, 첨두 유량, 투과, 증발산량, 토양 함수량 등에 대해 일단위로 시뮬레이션 할 수 있다. 모델 내에서 고려되는 수문 현상으로는 지표 유출, 침투, 증발산 등이 포함되며, 강우 에너지와 지표 유출에 의해 토양 침식이 발생하고 유출수에 용해되거나 토양입자에 부착되어 영양물질이 이동하는 것으로 해석한다. 유출량은 SCS 유출곡선지수법을 사용하여 예측한다. 침식과정은 강우로 인해 농경지의 토양이 운송 또는 퇴적되는 과정을 나타내며 침식량은 USLE 식을 사용하여 계산한다. 화학물질 모델은 농약과 비료 두부분으로 나누어지는데, 비료에 대한 영양물질 모델은 농경지에서의 질소와 인의 순환 및 유실을 추정한다. CREAMS은 작물 성장에 관련된 토양 종류와 토질 자료, 그리고 매달 간격으로 측정된 태양복사량 자료 등 많은 입력자료가 필요하며 다양한 모델 변수가 설정되어야 한다. 모델 적용 결과, 월별/연별 수문 및 영양물질에 관한 다양한 시뮬레이션 결과를 얻을 수 있다.

V. 사용지침

모델은 지금까지 개발된 영향예측 방법 중 가장 과학적이고 합리적인 방법이다. 특히 수리수문과 수질 분야 모델은 타분야에 비해 적용이 용이하고 예측력이 뛰어나다. 그러나 적용 현황에서 기술하였듯이 우리나라는 이 분야의 모델 사용이 극히 부진하며 사용이 이루진 경우도 적용방법에 많은 문제점이 나타나고 있다. 또한 영향예측시 합리적인 예측 조건이 주어지지 않고 저감대책에 따른 효과 분석이 이루어지지 않아 제시한 저감 대책이 어느 정도 실효성이 있는지 검토되지 못하고 있다. 따라서 환경영향평가시 매우 중요하게 검토되어야 할 수리수문과 수질변화 예측에 대한 신뢰성이 부족하다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 앞에서 제시된 현재 널리 사용되는 수리수문 및 수질모델 중 환경영향평가시 대상 수계와 사업 특성에 적절한 모델을 선정하고 적용하는 지침을 제시하고자 한다. 수리수문 모델을 영향평가에 적용할 경우 수질모델과 동일한 절차를 거치게 된다.

먼저, 기존에 개발되어 타당성을 인정받은 모델 중 예측하고자 하는 현상과 대상 수체의 특성에 적합한 모델을 선정하여야 한다. 다음으로는 모델의 조건에 적합하게 수계를 구획화하고 모델에서 요구되는 기본 입력자료를 결정하는 모델 구성 과정을 거치게 된다. 모델의 선정과 구성단계가 끝나면, 보정과 검증 단계를 거치게 된다. 보정과 검증이 완료된 후에는 사업으로 인한 공사시 및 이용시에 예상되는 수리수문조건을 모델

에 입력하여 영향을 예측하게 된다. 일반적으로 대상수계에서 나타날 수 있는 최악 조건, 즉 최고의 강우강도와 지속시간을 모델에 가정하여 예측한다. 영향예측 결과 대상 수계에서 나타나는 악영향을 검토하게 된다. 예측된 유출수량이 하천의 통수량보다 크거나 최저 유지수량보다 적을 경우 적절한 저감대책이 강구되어야 하고 저감대책에 따른 개선 효과를 영향예측에서 사용한 모델을 이용하여 분석하게 된다. 대상 수체별 모델 적용 결과는 김 등[1]에 제시되어 있다.

1. 모델 선정

기존 모델을 사용하여 수리수문분야에 대한 모델링을 수행하는 경우, 모델 사용지침서의 내용과 예측모형의 기본 원리를 충분히 이해하여 적절한 모델을 선정하여야 한다. 수문 모델의 대부분은 Program Package 형태이다. 즉 강우--유출해석을 위한 각 과정에 대해 사용 가능한 여러 식들이 포함되어 있으며, 사용자가 원하는 식을 선택하여 적용할 수 있다. 따라서 이러한 식들이 갖는 제한점과 적용가능지역의 제한 등을 파악하여 각 과정에서 사용할 식을 결정하는 것이 중요하다. 예를 들어 HEC-1 또는 TR-20 등의 모델에서 단위 수문곡선(Unit Hydrograph)를 이용하여 표면 유출과정을 예측하고자 할 때 자주 사용되는 변수로 지연시간(Lag Time) 또는 집중시간(Time of Concentration)을 들 수 있는데, 이러한 변수는 강우사상에 대한 배수구역의 반응시간으로 주로 유역의 지형과 지면 특성에 따라 좌우된다. 이러한 지형과 지면 특성을 고려하여 모델에서 제공하는 계산식 중 적절한 식을 선정하여야 한다. 대부분의 환경영향평가 대상 사업들은 넓은 지역을 개발하기 때문에 사업특성에 따라 적절한 모델을 선정하기보다는 적용 대상 유역에서 요구되는 자료에 따라 모델을 선정하게 된다.

현재 WMS(Watershed Modeling System)에는 널리 사용되는 수문모델인 HEC-1과 TR-20, 그리고 NFF 등이 포함되어 있다. WMS는 이러한 수문 모델의 입력 자료와 예측 결과를 쉽게 표현할 수 있도록 개발한 GUI(Graphic User Interface)로 사용이 편리하다. 수문변화가 예상되는 모든 사업에서 WMS를 적용하여 대상 수계에 나타나는 수문 현상에 적절한 모델을 선정하는 것이 좋을 것으로 사료된다.

앞에서 설명하였듯이 영향평가시 특별한 경우에는 수문현상 변화만이 평가사항이 될 수 있으나 많은 사업에서 수문현상과 함께 공사시와 이용시에 지면으로부터 유출되는 비점오염물질을 산정하여야 한다. 따라서 비점오염물질 부하량산정과 수문현상 예측을 동시에 하여야 할 경우는 유역모델을 적용하는 것이 좋다. 유역모델은 수문모델보다 많은 입력자료를 필요로 하는 단점이 있다. 그러나 골프장이나 스키장 건설과 같이 비점오염원이 주요 환경영향요소인 사업에는 유역모델을 사용하여 좀더 과학적인 영향평가가 이루어지도록 하여야 한다. 도시나 공단 개발과 같이 사업 후 유역에 우수관로가 있고 지면이 불투수지역이 많은 도시형일 경우는 STORM이나 SWMM과 같은 모델이 적합하며 골프장이나 스키장과 같은 비도시형일 경우는 AGNPS나 SWRRBWQ와 같은 모델이 적합하다.

수리현상 예측을 위해 현재 활용 가능한 모델로 HEC-2와 FEMWMS-2DH 그리고 RMA-2 등이 있다. HEC-2는 수량 증가로 인한 수위 변화에 대해 예측할 수 있는 1차원 모델이기 때문에 영향평가에서는 크게 활용도가 없을 것으로 예상된다. FEMWMS-2DH와 RMA-2는 모두 유한 요소법을 사용하는 2차원 모델로 기본원리가 동일하다. 또한 두 모델 모두 수량증가 및 지형변화에 따른 유속의 세기와 방향 변화를 예측할 수 있다. 그러나 RMA-2는 수질모델 RMA-4를 함께 사용할 수 있는 장점이 있으며 사용자 편이를 위한 SMS(Surfacewater Modeling System)이라는 GUI

가 개발되어 있어 입력 자료 작성과 예측결과 표현이 편리하다.

2. 모델 적용

선정된 수리수문 모델을 적용하기 위해서는 대상유역을 모델 입력조건에 적합하게 구성하여야 한다. 즉 대상 유역을 수문학적으로 동일한 소유역으로 구획화하고 각 소유역과 하천 그리고 호수 등의 구성 요소들이 연결된 시스템으로 구성한다. 한편 사업으로 인하여 변화하는 유역의 토지이용도를 적절히 표현하고 유역 내 나타나는 다양한 변화를 모델에서 적절하게 고려하기 위하여 소유역의 크기를 조절하여야 한다.

유역을 구획화 한 후에는 각 구성 요소의 지형특성을 나타내는 자료를 입력하여야 한다. 지형도에 나타난 자료를 직접 입력하는 방법도 이용되고 있으나, 최근 GIS(지리정보시스템)를 이용하여 자료를 입력하기도 한다. 유역모델도 적용과정은 수문모델과 유사하나 비점오염물질 부하량 산정을 위하여 많은 입력자료를 필요로 한다. 수리 모델의 경우 수문모델과 마찬가지로 대상수체를 모델 입력조건에 적절하게 구성하는 과정을 거치게 된다. 즉 수심 또는 하폭 그리고 유량증가 등으로 인한 수리현상을 변화를 시뮬레이션하기 위해서는 대상 수체를 적용 모델에 적합하도록 구성하여야 하며, 사업 후 나타나는 지형이나 유량의 변화도 고려되어야 한다. 다음으로 모델링을 위해 요구되는 변수들을 입력하여야 한다. 요구되는 자료는 모델이 채택하고 있는 수식에 따라 다소 차이가 있으나, 대략적으로 대상수계 및 유역의 지형적 특성(유역면적, 경사도, 하천의 길이, 토양의 특성)이나 수리학적 자료(조사된 유량, 유속, 수위 등)가 요구된다.

3. 보정 및 검증

대상 유역과 수체의 지형 특성에 적합하게 구성된 모델이 현장에서 나타나는 수리수문 현상을 정확하게 표현할 수 있도록 실제 측정된 자료를 이용하여 보정하고 검증하는 과정이 필요하다. 수리수문현상은 물리적인 현상이기 때문에 실측자료를 이용한 보정 및 검증과정이 없어도 예측력이 비교적 좋으나 정확도를 높이기 위해 보정과 검증을 실시하는 것이 좋다. 유역모델도 수문모델과 유사하게 보정과 검증이 이루어지면 예측력이 좋으나 보정과 검증을 위한 현장에서 실측하기 어렵고 경비가 많이 소모된다. 또한 환경영향평가는 사업이 이루어지기 전에 실시하기 때문에 공사시나 이용시에 나타나는 상황과 동일한 조건에서 보정검증을 위한 자료를 측정하기 어렵다.

수문모델의 결과를 보정하기 위해서는 대상 유역내의 우량관측소에서 실측된 강우자료와 모델에서 지정한 지점에서의 수문곡선(또는 최대유량)이 필요하다. 즉 실측된 강우사상를 사용하여 강우-유출과정을 시뮬레이션한 후, 예측된 수문곡선을 관측된 수문곡선과 비교하여야 한다. 보정이 완료되면 보정시에 사용되지 않았던 다른 날의 실측 강우자료를 이용하여 모델을 검증한다.

수리모델의 보정을 위해서는 유속 및 수위자료가 이용될 수 있다. 즉 대상수계 내 임의의 한 지점에서 연속 측정된 유속자료와 모델에 의해 계산된 유속값을 비교하여 보정을 실시한다. 보정이 완료되면 보정시에 사용되지 않았던 지점 또는 보정에서 사용되지 않은 시간의 유속자료를 이용하여 모델을 검증한다.

4. 영향예측

보정 및 검증이 완료된 모델을 이용하여 사업으로 인하여 나타나는 주요한 수리 수문변화를 예측하게 된다. 일반적으로 수리수문 분야의 영향예측에서 주요하게 다루는 항목은 강우시 유역으로부터 유출되는 수량 변화와 대상 수역의 유황(유속, 유량, 수위 등)변화 등이며 공간적 범위

는 사업으로 인하여 영향이 미칠 것으로 예상되는 유역과 수역을 포함한다.

사업으로 인해 지형 경사도와 지면 투수도 등이 변화하는 경우 이러한 변화를 보정 및 검증이 완료된 모델에 입력하여 강우시 유출되는 수량을 예측하게 되며, 예측시 강우 강도와 강우지속 시간과 같은 입력조건은 최악의 경우를 가정하여야 한다. 또한 사업시행으로 인하여 나타날 수 있는 대상 수역의 지형변화와 수문모델에서 예측된 수량변화를 수리모델에 입력하여 유속의 방향과 세기 등을 예측하게 된다.

VI. 결 론

대부분의 환경영향평가 대상사업들은 유역의 수문현상과 수체 내 수리 및 수질변화에 매우 중요한 영향을 미친다. 최근 국내에서 보고된 194건의 환경영향평가서에 제시된 수리수문분야를 검토해 본 결과 여러 가지 문제점이 나타나고 있었다. 검토한 많은 평가서에서 특별한 경우를 제외하고 수리수문을 평가항목으로 선정하지 않고 있으며 평가항목으로 선정한 경우에도 모델을 이용한 정량적인 예측은 극히 드물게 이루어지고 있다. 모델을 사용하는 경우도 보정과 검증과정을 거치지 않고 있으며 예측조건의 결여로 예측 사항에 대한 신뢰성이 없다. 이러한 문제점들을 개선하기 위해서는 과학적인 영향예측 방법들이 제시되는 것이 필요하며 지금까지 개발되어 온 수문모델과 수리모델 그리고 유역모델을 대상 수계와 사업 특성에 적절하게 선정하여 적용하는 것이 필요하다.

강우현상으로 인하여 지면으로부터 유출되는 토사와 이용시 비점오염 물질 유출량을 산정하기 위하여 현재 사용하는 방법은 비과학적이며 이를 개선하기 위하여 유역모델을 사용이 필요한 것으로 사료된다. 유역모델은 강우시 유출수량과 오염부하량을 동시에 계산할 수 있기 때문에 비점오염원 부하량 산정 뿐만 아니라 수문변화 예측에도 좋은 도구로 사용될 수 있다.

유역모델과 수질모델은 수문현상과 수리현상을 포함하고 있기 때문에 영향평가에서 이러한 모델들이 효과적으로 사용되기 위해서는 수리수문과 수질분야가 하나의 수환경 분야로 통합되고 유역과 수용수체에서 일어나는 영향을 유역모델과 수질모델로 예측하고 특별한 경우 독립된 수문모델과 수리모델이 선택적으로 사용하는 것이 좋을 것으로 사료된다.

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. 박석순, 나은혜, 2000, 환경영향평가에 사용되는 컴퓨터 모델에 관한 연구 Ⅰ: 수질모델, 환경영향평가학회지 9(1): 13-24.
3. Brigham Young University - Engineering Computer Graphics Laboratory, 1997, Watershed Modeling System WMS 5.0.
4. Environmental Modeling System Inc., 1998, Hydrodynamic Modeling with SMS", Orlando, Florida.
5. Jennings M.E. et. al., 1994, Nationwide Summary of U. S. Geological Survey Regional Regression Equations for Estimating Magnitude and Frequency of Floods for Ungaged Sites, U. S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 94-4002, Reston, Virginia.
6. Shoemaker L. et. al., 1997, Compendium of

Tools for Watershed Assessment and TMDL Development, Report EPA841-B-97-006, U.S. Environmental Protection Agency, Athens, GA.

7. Soil Conservation Service, 1992, TR-20 Computer Program For Project Formulation Hydrology.
8. U.S. Army Corps of Engineers, 1980, HEC-1 Flood Hydrograph Package User's Manual.
9. http://water.usgs.gov/softwarer/feswms.html
10. http://www.bossintl.com/html/download, HEC-2 User's Manual
11. http://www.cee.odu.edu/cee/model/agnps.html
12. http://www.cee.odu.edu/cee/model/swrrbwq.html
13. http://www.epa.gov/ednnrmrl/tolls/model/swmm.html
14. http://www.epa.gov/ednnrmrl/tolls/model/dr3m.html
15. http://www.shadow.net/~xpsoft/hec5q.html