특집

# 비점 오염원 수질 모델링
## Modeling of Nonpoint Source Water Quality

**전 경 수** (성균관대학교 공과대학 토목공학과 조교수)

### 1. 머리말

오염원은 그 관점에 따라 많은 분류 방법이 있겠지만 그 중의 하나로서 점 오염원(point source)과 비점 오염원(Nonpoint source)으로 분류할 수 있다. 이들의 방법 또한 다양하겠으나, 일반적으로 식별 가능한 명확한 경로를 통하여 유입하며 그 양을 판정할 수 있는 오염원을 점 오염원으로, 그 외의 오염원을 비점 오염원으로 정의할 수 있을 것이다. 즉, 비점 오염원은 주로 토지 상에 또는 대기 중에 분포되어 있으며, 간헐적으로 유입하기 때문에 그 양과 유입경로를 판별하기 어렵다. 비점 오염원에 의한 오염문제는 1970년대 중반까지만 해도 일반에게 거의 인식되지 않았었다. 이 때까지만 해도 오폐수의 수송, 처리 및 투기 문제가 물 공급 문제와 더불어 환경공학 분야의 주 관심사였다고 할 수 있다. 도시화에 따른 우수 관거의 설치, 우수거와 하수거의 분리 및 배수 하천의 직강화 등이 추진되는 정도였다. 비료와 농약 등 토양오염 물질과 도시화 및 자동차의 증가 등에 따른 각종 대기오염 물질의 증가로 비점 오염원이 생태계에 미치는 폐해가 심각해지고 있으며, 우리 나라의 경우도 예외는 아니다. 이에 따라 비점 오염원이 환경에 미치는 영향의 평가, 악영향을 감소시키기 위한 조절 대책의 수립 등을 위한 투자와 연구가 많은 국가에서 이미 활발히 진행되고 있다. 국내의 경우에는 이에 대한 관심 및 체계적인 연구가 상대적으로 미흡하며, 특히 도시 지역 우수 유출문제에 대한 관점은 수량의 조절 문제에 주로 편중되어 비점 오염원에 의한 수질의 문제는 소홀히 다루어지고 있는 현실이다.

비점 오염원이 수체에 미치는 영향의 평가 또는 그 조절방안의 수립 등을 위한 유용한 수단으로서 수학적 모형이 널리 사용되고 있다. 물론 비점 오염원과 관련된 모든 수질문제가 모형의 적용을 필요로 하는 것은 아니나, 특히 다음과 같은 목적을 위해서는 유용하게 쓰일 수 있다(Donigian과 Huber, 1991).

(1) 비점 오염원의 공간적 분포 또는 유출수량과 수질의 시간적, 공간적 특성을 파악하기 위하여

(2) 비점 오염원이 유출되는 수체, 즉 하천, 호소 등의 수질을 분석하기 위한 입력자료를 제공하기 위하여

(3) 비점 오염원의 조절을 위한 여러 대안들(용량, 위치 등)의 효과를 분석하기 위하여

(4) 빈도해석에 의하여 농도, 부하량 등 수질변수들의 재현기간을 결정하기 위하여

(5) 비용/편익 분석을 위한 입력자료를 제공하기 위하여

본고에서는 Donigian과 Huber(1991)의 내용을 중심으로 현재까지 잘 알려져 있는 비점 오염원의 수질모의에 관한 방법론을 요약하여 기술하고, 도시 비점 오염원 수질모형을 주로 하여 널리 사용되고 있는 전산모형들에 관하여 소개하고자 한다.

### 2. 비점 오염원 수질모의 방법

#### 2.1 일정농도법 및 단위 부하량 방법

일정농도법은 문자 그대로 유출수에 포함된 어떤 오염물질의 농도가 항상 일정하다고 가정한다. 이에 따라 어떤 물질의 연간 총 유출부하량은 연간 총 유출

수량에 일정농도를 곱함으로써 간단히 산출될 수 있다. 또한 일정농도 방법을 유출 수문모형과 결합함으로써 유출 오염부하량의 변화를 산정할 수 있다. 즉, 수문모형으로부터 유출량의 시간변화를 모의하고 여기에 일정농도를 곱함으로써 유출부하량의 시간변화를 모의할 수 있다. 이때 사용되는 일정 농도의 값은 일반적으로 지역에 따라 다르므로 대상지역에 대한 측정결과로부터 도출하는 것이 바람직하다. 이러한 측정자료가 없는 경우에는 인근 지역의 가용자료를 사용할 수도 있을 것이다. 일반적으로 어떤 지점에서의 특정 유출사상에 대한 평균농도(event mean concentration; EMC; 총 유출부하량을 총 유출수량으로 나눈 값)는 유출사상마다 어느 정도 차이를 나타내는 것으로 알려져 있다. 일정농도법을 사용할 경우에는 유출유량의 변화에 따른 유출 부하량의 변동은 모의할 수 있으나 EMC의 변화에 따른 오염부하량의 변화를 모의할 수는 없다는 한계가 있다. 따라서 일정농도법은 유출유량에 따른 오염부하량의 변화 및 연간 총 유출부하량의 산정 등의 목적으로 사용될 수 있으나, 오염원 유출 부하량의 조절 방안 수립 또는 하천, 호수 등 오염원이 유출되는 수체의 수질변동 예측 등의 목적으로 사용하기에는 부적합하다.

어떤 오염원에 관한 단위 부하량(unit load)은 단위 시간당, 단위 면적 당 유출되는 오염물질의 질량으로서 정의된다. 여기에 유역 면적을 곱하면 유역 총 부하량이 산출된다. 단위 부하량은 지역적 특성에 따라 크게 다르며 인구 및 수문학적 요소들에 따라 좌우된다. 단위 부하량은 장기간의 유출부하량을 근거로 한 평균적인 값으로서 매년 그 값이 변화하는 것은 아니다. 최적 관리방안(Best Management Practice; BMP)의 적용에 따른 오염원 감소 효과가 잘 알려져 있는 경우에는 그에 따라 단위 부하량의 값을 감소시켜 사용할 수 있다는 편리한 점이 있다. 미국의 환경보존국(Environmental Protection Agency; EPA)에서는 토지 이용 유형별로 단위 부하량에 관한 조사를 수행한 바도 있으나(McElroy 등, 1976), 단위 부하량은 지역적 변동성이 매우 커서 특정 유역에 대해 조사된 값을 다른 유역에 적용하기는 어렵다. 단위 부하량은 위에서 기술한 일정농도 값으로부터 구할 수도 있다. 예를 들어, 연간 단위 부하량은 일정농도 추정치에 단위 면적 당 연 유출량을 곱함으로써 산정된다. 한편 Heaney 등(1975)은 지표면으로부터의 연간 토사 유실량을 추정하기 위한 범용 토양유실 방정식(universal soil loss equation)을 개발한 바 있는데 특정 오염원과 부유물질의 농도 또는 부하량간에 비례관계가 있다고 볼 수 있다면 이로부터 그 오염물질에 대한 연간 부하량을 산정할 수 있다. 이때 특정 오염원과 부유물질간의 비를 잠재계수(potency factor)라 하며 그 값들에 대해서는 Lager 등 (1997) 및 Manning 등(1997)에 의하여 조사된 바 있다.

### 2.2 통계적 방법

이 방법은 유출사상 평균농도(EMC)에 관한 유도확률분포 개념에 근거한 것으로서 도시유역의 유출수질 문제는 물론이고 유출량의 모의에 관한 연구에도 이와 유사한 개념이 널리 적용된 바 있다(Howard, 1976 ; Loganathan과 Delleur, 1984). EPA에 의하여 처음 보고된(Driscoll 등, 1979) 이 방법은 EMC들이 일정한 것이 아니고 대수정규 분포에 가까운 경향을 보인다는 사실을 이용한 것으로서, 이러한 EMC의 분포와 역시 대수정규 분포로 가정한 유출량의 분포로부터 유출부하량에 관한 확률분포를 유도할 수 있다. 또한 이를 하천유량에 관한 확률분포와 결합함으로써 하천수의 농도에 관한 확률분포를 유도할 수 있다(Di Toro, 1984). Di Toro와 Small(1979) 및 Small과 Di Toro(1979)는 이러한 통계적 모형에 근거하여 저류조 및 처리 용량을 분석하기 위한 해석적 방법을 개발한 바 있다. 또한 합류식 하수거의 월류수 및 고속도로에서의 유출에 대해서도 이러한 통계적 방법이 적용되어 왔다.

통계적 방법의 주된 가정은 EMC가 대수정규 분포를 따른다는 것이다. 따라서 농도 분포는 중간값(median)과 변동계수(coefficient of variation)에 의해 결정된다. EMC의 대수정규 분포성은 적합한 가정으로 알려져 있으나, 이와 결합되는 유출수문 모형으로는 대개 유출계수법이 사용되기 때문에 도시화가

덜 된 지역일수록, 즉 투수성이 큰 지역일수록 정확도가 떨어지게 된다. 그러나 도시지역 하천 수질의 주 관심사는 우수의 유출이므로 기준수질의 초과정도를 평가하는데 있어서는 EMC 분포의 예측에 따른 통계적 방법이 유용하게 사용될 수 있다. 또한 BMP의 효과분석을 위하여 일정 제거율을 적용하면 변동계수를 감소시키는 효과를 가져오며, 이로부터 산정된 결과로부터 BMP의 효과를 개략적으로나마 평가할 수 있다. 통계적 방법의 적용을 위한 입력 자료는 강우의 통계적 특성(강수사상별 총 강우량, 지속시간, 강우강도 및 강우사상 사이 기간의 평균치 및 변동계수), 유역면적, 유출계수 및 오염원에 대한 EMC 중간치 및 변동계수 등이다. 오염물질이 유입되는 하천의 수질을 평가하기 위해서는 하천 유량의 평균치 및 변동계수와 상류단 농도조건이 주어져야 한다. EMC의 중간치와 변동계수를 구하기 위해서는 일정농도법의 경우와 마찬가지로 대상지역에 대한 측정이 요구된다. 미국의 경우 대부분의 도시지역 오염물질에 대한 변동계수는 거의 일정한 것으로 알려져 있다. 또한 수량 및 수질 변수들에 대한 빈도해석은 HSPF, SWMM 또는 STORM과 같은 연속 모의모형의 계산결과를 이용하여 수행할 수도 있다.

### 2.3 회귀분석에 의한 접근 방법

강우량, 유출량 및 수질 측정자료가 축적됨에 따라 오염부하량과 EMC를 유역 특성, 인구 통계적 특성 및 수문 특성을 나타내는 변수들과 연관시키기 위한 회귀분석이 수행되어 왔다(McElroy 등, 1976; Brown, 1984; Tasker와 Driver, 1988). 또한 비강우기간 동안 합류식 하수거에 퇴적되는 오염원의 양을 산정하는 데에도 회귀분석 방법이 사용되어 왔다(Pisano와 Queiroz, 1977). 이러한 회귀분석의 특별한 형태로서 유량 또는 유출수량에 대한 오염원의 농도 또는 부하량의 관계를 나타내는 것을 보통 rating curve라 칭한다. 이는 자연하천에서의 유사량을 유량의 함수로 나타내는 식 또는 곡선을 sediment discharge rating curve라 하는 것과 같은 맥락에서 이해될 수 있다.

Rating curve에 의한 접근방법은 대개 총 유출부하량과 유출수량의 관계를 추정하는데 사용되나 유출사상 중의 변화를 모의하는 데도 이러한 방법이 사용될 수 있다(Huber와 Dickinson, 1988). 대개 농도와 유출유량 또는 수량간에는 상관관계가 거의 없는 것으로 나타나는데 이는 결국 일정 농도치를 가정하는 것이 타당성 있음을 의미하는 것이라 하겠다. 부하량은 농도와 유량의 곱이므로 농도와 유량의 상관성 여부에 관계없이 부하량은 유량과 높은 상관성을 나타내는 것이 보통이다. 만약 부하량이 유량에 따라 선형적으로 변화한다면 일정 농도의 가정은 정확히 성립한다. 그렇지 않은 경우에는 농도와 유량간에 어떤 관계가 있음을 내포하는 것이 된다. Rating curve는 부하량과 EMC를 추정하는데 직접 사용될 수도 있고, SWMM 또는 HSPF와 같은 계산 모형의 일부로 포함될 수도 있다.

미국 지질 조사국(United State Geological Survey; USGS)에서는 미국 내 30개 도시 98개 지점에서의 강우, 유출 및 수질 자료를 취합하여 이를 이용한 다중회귀분석을 수행하였는데(Tasker와 Driver, 1988), 그 결과로 호우 유출 오염부하량 및 호우 유출 수량에 관한 34개의 다중회귀모형과 호우 유출 EMC에 관한 31개의 모형이 개발된 바 있다. 이 때 호우 총 강우량과 배수유역 면적이 가장 중요한 변수인 것으로 나타났으며 몇몇 모형의 경우에는 불투수 면적, 토지 이용형태 및 연평균 기후 특성 등도 의미 있는 변수인 것으로 나타났다. 용존물질, 총 질소 및 총 유기성질소 등에 대한 부하량 추정 모형이 전반적으로 가장 정확한 반면, 부유물질에 관한 모형이 가장 정확도가 떨어지는 것으로 드러났다. 또한 연평균 강우량이 큰 지역일수록 건조 지역에 비하여 개발된 모형의 정확도가 떨어지는 것으로 나타났다.

회귀모형을 사용할 경우에는 EMC 값들의 예비 결정 과정이 불필요하므로, 수질 관측자료는 회귀모형 산정 결과의 검증 이외의 목적이 아니라면 필요하지 않다. 이와 같이 간편한 점이 있는 반면 통계적 방법의 경우와는 달리 산정된 값의 확률분포를 제공할 수 없다는 단점이 있다. 또한 회귀분석에 의한 접근 방법

은 회귀모형의 유도에 사용된 자료의 범위를 벗어나는 경우에 대하여 적용하면 외삽에 따른 오차가 클 수 있으므로 그 적용에 주의를 요한다.

### 2.4 축적 및 쓸림의 개념에 따른 모의방법

1960년대 후반 APWA(1969)에서는 먼지와 오물(dust and dirt) 및 이와 관련된 오염물질들이 도시지역 도로면에 계속적으로 축적됨을 보였다. 또한 Sartor와 Boyd (1972)는 오염물질의 표면 축적과 더불어 이들이 강우 시에 지수 함수적으로 쓸려 나감을 보인 바 있다. 이러한 축적(buildup) 및 쓸림(washoff)의 개념은 그 정도의 차이는 있으나 SWMM, STORM, HSPF 등의 모형에 반영되었다. 축적은 퇴적, 바람에 의한 침식 등 비 강우기에 일어나는 모든 현상들이 집약하여 나타내는 포괄적인 개념의 용어이다. 즉, 이러한 모든 과정들이 결국 물질의 축적으로 귀결되고 축적된 물질들은 호우사상시 쓸려나가게 된다는 간단한 개념이다.

이러한 축적 및 쓸림의 기구를 포함하는 모형들은 언뜻 보기에는 물리적 현상에 근거한 모형으로 보일 수 있으나, 실제로는 매우 개념적인 알고리듬을 사용하고 있다. 이는 오염원의 축적 과정을 지배하는 실제 물리현상은 유사의 이동 및 침식인데 반하여 축적 및 쓸림의 개념이 이러한 물리적 측면을 제대로 반영할 수 없기 때문이다. 또한 도시 지역 지표면의 불균질성 때문에 축적 및 쓸림에 관한 모형의 매개변수로는 유역 전체에 대한 평균적인 값을 사용할 수밖에 없으며, 이는 결국 유역 말단에서의 수질 관측 자료를 이용한 모형의 보정을 필요로 하게 된다. 따라서 관측자료가 가용하지 않은 경우에는 모형의 정확성을 기대하기 어렵다.

모형에 사용되는 축적과 쓸림의 기구는 모형마다 차이가 있으며 SWMM 모형이 가장 넓은 선택의 폭을 제공한다. 모형의 보정 과정을 거칠 경우 관측 농도와 계산치가 상당한 정도까지 일치하게 할 수 있으며, 앞서 기술된 다른 모형들과는 달리 호우기간 중의 수질 변화 또한 잘 모의할 수 있다. 각종 오염원별 축적률(buildup rate)은 Manning 등(1977)에 의하여 조사된 바 있으며, 쓸림계수(washoff coefficient)값에 대한 선정 지침은 Huber와 Dickinson(1988) 등에서 찾아볼 수 있으나 일반화된 자료는 찾아보기 어렵다. 또한 이와 같이 문헌에 주어진 계수 값들을 사용하여 계산된 결과는 실제와 크게는 수십 배의 편차를 보일 수도 있으며, 따라서 정확한 계산을 위해서는 관측자료를 이용한 모형의 보정 및 검증과정이 필요하다. 즉, 앞서 기술된 방법들의 경우와 마찬가지로, 축적 및 쓸림의 모형 또한 모형의 보정 및 검증을 위한 적절한 자료가 없는 경우에는 수질 조절 대안들의 비교평가, 심각한 오염물질의 판별 등의 정성적 분석을 목적으로 사용될 수 있는 정도이며, 오염원이 유출되는 수체에 대한 수질 모형의 입력 자료를 제공하기 위한 목적 등으로 절대수치를 산정하는데 사용하기에는 부적합하다. 저류조 용량의 설계 등을 목적으로 호우기간중의 농도 및 부하량의 변동을 상세히 모의하는 데에는 축적 및 쓸림 모형이 다른 모형들에 비하여 적합하다.

## 3. 도시 비점 오염원 수질모형

앞절에서 기술된 바와 같은 도시 비점 오염원에 따른 수질모의 기법의 적용에 있어서 일정농도법 등 그 방법이 간단한 경우에는 굳이 별도의 전산모형을 사용하지 않고도, 단순한 계산만으로도 모의가 가능하다. 그러나 사용하고자 하는 모의기법이 복잡하거나 소유역의 수가 증가함에 따라 전산모형을 필요로 하게 된다. 이러한 전산모형들 중 어떠한 것을 사용할 것인가는 모형의 사용 목적, 관측자료의 가용성, 모형의 신뢰성, 사용자의 선호도 등에 따라 좌우될 것이나, 기본적으로 쉽게 구할 수 있고, 모형의 사용법을 숙지할 수 있는 지침서 등이 있으며, 과거 다른 사용자들의 적용례 등 참고할 만한 문헌자료가 있는 모형이어야 할 것이다. 이러한 관점에서 본 연구에서는 상업용 소프트웨어나 개인용 컴퓨터에서 사용할 수 없는 모형들은 논외로 하고, 도시 비점 오염원 수질모형으로서 현재 가장 널리 사용되고 있는 공용(public domain) 모형인 STORM(Storage, Treatment,

Overflow, Runoff Model), SWMM(Storm Water Management Model) 및 HSPF(Hydrologic Simulation Program- FORTRAN) 등의 모형에 대하여 살펴보기로 한다. 물론 이들 모형이 현재 가용한 모형의 전부는 아니나, 현재 가장 많은 사람들이 사용하고 있는 모형들이다.

### 3.1 STORM 모형

STORM 모형은 시간(hour) 단위의 연속 모의를 위한 계산모형으로서, 유출량 및 수질계산 방법은 매우 간단하다. 유출량의 계산에는 유출계수법, SCS 방법 또는 이들의 조합형이 사용될 수 있다. 유출계수법을 적용하는 경우에는 투수지역의 유출계수와 불투수지역에 대한 유출계수를 해당 면적으로 가중 평균하여 구한 유출계수를 사용하여 매 시간 유출고(runoff depth)를 계산한다. 불투수 지역에 대해서는 유출계수법을, 투수지역에 대해서는 SCS 방법을 적용하여 이들 계산 결과의 합으로서 유출고를 모의할 수도 있다. 홍수추적은 수행되지 않으나, SCS 단위도법은 적용 가능하다. 유출수는 처리시설로 유입되며 처리용량을 초과하는 수량은 저류조로 분기된다. 저류 용량을 초과하는 수량은 월류(overflow)된다. 이와 같은 일련의 과정이 포함되어 있는 것은 STORM 모형이 원래 합류식 하수거에 관한 모의 모형으로서 출발한 데서 비롯한다. 호우사상이 종료되면 저류조의 잔여 수량은 처리시설로 이동된다. 시간별 강수량이 입력자료로 사용되며 융설의 모의도 가능하다. 건기의 흐름도 모의가 가능하며, 이는 호우 사상시에는 기저유량으로서 호우 유출수와 혼합되어 유출된다.

수질계산에 있어서는 축적 및 쓸림 모형이 사용된다. 축적량은 선형적으로, 쓸림 과정은 지수함수로서 각각 모의하며, 한 번에 6개의 오염물질에 대한 계산이 가능하다. 범용 토양 유실 방정식을 사용하여 침식을 모의할 수 있다. 호우 유출은 건기 유량과 혼합되어 처리 시설로 이동되며, 이 과정에서 오염물질의 감쇠 및 반응 등의 과정은 고려되지 않는다. 처리시설을 통과하는 흐름은 100% 처리되는 것으로 간주하여 부하량으로 포함되지 않으나, 처리 시설이나 저류조로 유입되거나 월류되는 흐름의 농도와 부하량 산정치는 제공된다.

STORM 모형은 다른 연속 모의 모형들에 비하여 흐름 및 수질계산 과정이 간단하기 때문에 필요한 입력 자료가 적은 편이다. 유출계수 값은 각종 지침서나 교과서 등에서 찾아볼 수 있고, SCS 방법과 관련된 매개 변수들은 토양의 유형별로 널리 제시되어 있다. 축적 및 쓸림 과정에 대한 모형 선택의 폭이 SWMM, HSPF 등의 다른 모형에 비하여 좁기 때문에 계산치와 관측치가 잘 일치되도록 관련된 매개변수들의 값을 추정하기가 비교적 어렵다. 일반적으로 모형의 보정이 필요한 반면, STORM 모형이 한 시간 단위의 연속 모의 모형이라는 점에서 그 중요성이 반감되는 측면도 있다.

모형의 계산결과로서 각 호우사상에 대한 유출 수량, 농도 및 부하량뿐만 아니라 저류조와 처리시설의 이용 상황 및 총 월류부하량과 농도가 주어진다. STORM 모형에서는 유출유량이 단위 시간당 처리수량 이상으로 증가하는 시점부터 그 이하로 감소하는 시점까지를 하나의 호우사상으로 간주하는데, 선택된 호우사상에 대해서 시간 단위의 유출 수문곡선 및 오염도 곡선을 제시해 준다. 연 단위 또는 전체 계산기간 동안의 계산 결과에 대한 통계가 제공되며 이로부터 조절률, 즉 저류조를 거쳐간 수량의 총 유출수량에 대한 백분율과 월류 발생횟수 등을 파악할 수 있다. 따라서 저류 및 처리 용량의 여러 조합에 대한 계산을 수행함으로써 최적의 처리 방안을 도출해 내는데 사용할 수 있다.

앞에서도 언급한 바와 같이 STORM 모형의 유출량 계산방법은 매우 간단하기 때문에 필요한 입력자료가 많지 않은 대신, 관측 수문곡선에 잘 맞는 매개변수 값들을 추정하는데 어려움이 따른다. 이는 수질계산에 있어서도 마찬가지로서, STORM 모형의 수질 계산 과정은 초기의 SWMM 모형을 거의 답습한 것으로서, 관측 오염도 곡선과 모형의 계산결과를 잘 일치시키기가 쉽지 않은 것으로 알려져 있다. SWMM 모형의 경우에는 수질계산 부분이 계속 개선, 발전되어 온 반면 STORM 모형의 경우에는 이러

한 점에 대한 개선이 이루어지지 않고 있다.

STORM 모형은 도시유역에 대한, 특히 수질을 포함하는, 연속 모의 모형으로서는 거의 최초의 것으로서 San Francisco 만의 합류식 하수거 월류수의 감소를 위한 마스터 플랜에 적용하고자 미 공병단의 수공학 연구센터(Hydrologic Engineering Center: HEC)에서 처음 개발되었다(HEC, 1977). 모형의 보정 및 적용을 위한 지침서(Abbott, 1977) 등 모형 사용자에 대한 지원으로 1970년대 후반부터 1980년대 초반에 걸쳐 널리 사용되었으나, 이후 모형의 개선 및 보완이 계속되지 않았고 소형(개인용) 컴퓨터용 버전이 제공되지 않은 관계로 모형의 사용은 감소하게 되었다. 그러나 STORM 모형의 그 사용이 간편하기 때문에, 아직도 많은 사람들이 STORM 프로그램을 각자의 사용목적에 맞게 변형하여 널리 사용하고 있으며(Donigian과 Huber, 1991), 현재 STORM 모형의 전처리 과정을 포함한 소프트웨어인 ProStorm(Dodson, 1991) 등이 가용하여 개인용 컴퓨터를 통한 사용이 가능하다.

### 3.2 SWMM 모형

SWMM 모형은 모형의 입출력 등 전체적인 조절을 담당하는 EXECUTIVE 블록(block), 흐름, 수질계산 및 저류/처리 분석 등을 수행하는 RUNOFF, TRANSPORT, EXTRAN 및 STORAGE/TREATMENT 등 4개의 실행블록 및 모형의 입출력과 계산결과의 통계적 분석을 위한 5개의 보조블록으로 구성되어 있다. 우수거, 합류식 하수거 및 자연 배수 시스템에 대한 모의가 모두 가능하다. 강우-유출 과정은 비선형저수지 모형에 의하여 RUNOFF 블록에서 모의되며 융설에 대한 계산 및 지하수의 비포화 흐름에 대한 모의도 가능하다. 흐름 추적 방법으로는 비선형 저수지 모형(RUNOFF 블록), 운동파 모형(TRANSPORT 블록) 및 동역학적 모형(EXTRAN 블록) 등 비교적 간단한 방법에서 매우 상세하고 복잡한 방법에 이르기까지 다양하게 제공되며, 사용자가 원하는 바에 따라 이들 중 선택하여 사용할 수 있다. EXTRAN 블록은 배수 시스템에 관한 계산 모형으로서 현재 가용한 공용 소프트웨어 중 가장 종합적인 모형으로서 배수계산, 다양한 수공 구조물을 포함한 폐합형 관거 시스템에 대한 계산 등이 가능하다. 또한 STORAGE/TRANSPORT 블록에서도 저류지시법에 의한 흐름 추적이 가능하다.

수질계산은 RUNOFF 또는 TRANSPORT 블록에서 가능하며, EXTRAN 블록에는 아직 수질 모의 기능이 포함되어 있지 않다. RUNOFF 블록에서 적용할 수 있는 오염부하량 계산방법은 일정농도법, rating curve 방법, 축적 및 쓸림 방법, 범용 토양 유실 방정식 등으로서 다양한 선택의 폭이 주어진다. 축적 및 쓸림 모형의 적용 시 거리 청소에 따른 축적량의 감소 효과를 모의할 수 있다. 지하수 유출은 일정농도로만 모의 가능하다. RUNOFF 또는 TRANSPORT 블록을 사용하여 오염물질의 1차 감쇠를 모의할 수 있다. 또한 TRANSPORT 블록은 관거 시스템 내에서의 침식과 퇴적을 모의하고 건기의 흐름과 수질을 모의하는 데 사용될 수 있다. STORAGE/TREATMENT 블록은 저류조와 처리장치에서의 오염물질 제거를 모의한다. 그 방법으로는 완전혼합 또는 균일 균등 상태에서의 1차 감쇠를 모의하는 방법, 제거 함수(체류시간에 따른 퇴적량의 변화관계를 나타내는 함수)를 사용하는 방법, 또는 퇴적에 관한 동역학적 이론을 적용하는 방법 등 세 가지가 있다. 모의할 수 있는 오염물질의 종류에 제한은 없으나, 침식과 퇴적 현상에 대한 모의 능력은 STORAGE/TREATMENT 블록을 제외하고는 약한 편이다.

각 실행 블록들은 독립적으로 실행될 수 있으며, 여러 개의 블록을 사용할 경우 그 실행 순서에는 제약이 없다. 보조블록으로서 STATISTICS 블록은 계산결과의 통계적 해석을, RAIN 및 TEMP 블록은 강수, 증발, 온도 등 입력자료 처리를, GRAPH 블록은 그래픽 출력을, COMBINE 블록은 출력된 시계열 자료의 처리를 각각 담당한다.

SWMM 모형은 단일 소유역에 배수로망이 없는 아주 간단한 경우에서부터 많은 소유역과 수로 및 관로들이 포함된 매우 복잡한 경우에 이르기까지 모의가 가능하며, 각 경우마다 필요한 입력자료의 양도 크게

달라진다. 최소한의 입력 자료로서 유역면적, 불투수성, 경사, 조도, 요지 저류 용량, 침투 특성 등이 필요하다. 또한 수로 및 관로와 관련된 입력자료로는 단면형, 제원, 경사, 바닥표고, 조도 등이 있다. 축적 및 쓸림 방법에 따라 RUNOFF 블록에서 수질을 모의하기 위해서는 축적 및 쓸림 과정과 관계된 매개변수 값이 입력되어야 한다. 이들 값이 가용하지 않는 경우가 종종 있으며, 따라서 rating curve 방법이나 일정농도법이 적용되기도 한다. 강우자료는 개개 호우사상들에 대한 강우 주상도의 형태로 입력될 수도 있고, 장기간에 걸친 1시간 또는 15분 자료가 입력될 수도 있다. 모형의 보정과 검증을 위해서는 관측된 수문 곡선과 오염도 곡선이 필요하다.

SWMM 모형의 계산결과로서 유역내 각 지점의 시간별 유량, 수위, 오염물질 농도가 제공된다. 또한 계산결과의 계절별, 연도별 요약결과 등이 제시된다. STATISTICS 블록을 이용하여 호우사상의 분리 및 시계열의 빈도 해석을 수행할 수 있다. 계산된 수문곡선 및 오염도 곡선 그림을 관측치와 함께 출력할 수 있다.

SWMM 모형의 유량계산은 매우 상세하고 관측치와 잘 일치하는 결과를 주는 반면, 수질 계산 모형은 실제의 물리적, 화학적, 생물학적 과정을 제대로 나타내지는 못하고 있으나, 이는 다른 모형들의 경우에도 공통적으로 해당되는 사항이다. 소형컴퓨터용 버전이 가용하며 특히 최근 WINDOWS 용 버전(Lahiou 등, 1995)이 제공되기 시작하였으나 그래픽 처리 등은 미흡하다. 또한 XPSWMM, FTI/SWMM 등 SWMM 모형의 전 후처리용 商用 소프트웨어들이 개발되어 있다.

SWMM 모형은 미국 Metcalf and Eddy사, Water Resource Engineers사 및 Florida 대학의 공동연구로 1971년 최초 개발되었다. 이후 수년간은 EPA의 지원으로 Florida 대학에서, 그 이후로 현대까지는 EPA에서 관리해 오고 있다. SWMM은 많은 사람들이 쉽게 접근하여 사용할 수 있는 공용 소프트웨어로서, 특히 사용자 그룹의 학술회의를 자주 개최한 데 힘입어 계속적으로 수정, 보완, 개선되어 왔으며 현재 가용한 최신 버전은 버전 4이다(Huber와 Dickinson, 1988; Roesner 등, 1988). SWMM 모형은 많은 교과서에서 인용되고 있으며, SWMM과 관련된 학술논문이 다수 출판되어 왔다. 국내에서도 신현석과 윤용남(1993) 및 이종태와 강태호(1997) 등에 의하여 적용된 바 있다.

### 3.3 HSPF (Hydrologic Simulation Program-FORTRAN)

HSPF는 유역의 수문계산과 통상적 오염원 외에도 독성 유기물에 관한 수질을 모의하는 종합적인 유역 수문모형이다. 1966년 Stanford Watershed 수문모형에서 시작하여, 이후 비점 오염원 모형에 관한 EPA의 많은 연구 결과가 계속적으로 모형에 포함되어 왔다. 하도에서의 1차원 수질 모의과정을 포함하고 있으며 이밖에도 지표면과 토양에서의 오염원 유출과정과 퇴적물내 화학적 상호반응 및 점 오염원까지를 포함하는 유일한 통합모형이다. 이러한 통합적 기능으로 비 도시 지역에 관한 수문/수질 모형으로 널리 사용되어 왔으나 도시(불투수) 지역에 대해서도 SWMM과 유사한 방법으로 모의를 수행한다. EPA의 사용자 지침서(Bicknell 등, 1993)는 물론, 모형의 보정을 위한 전문가 시스템인 HSPEXP(Lumb 등, 1994)가 미국 지질 조사국에서 개발되어 가용한 상태이다.

## 4. 맺음말

이상에서 살펴본 모형들은 현재 가장 널리 사용되고 있는 가용 모형들로서 이들 중 어떤 모형을 사용할 것인가는 모형의 사용목적, 관측자료의 가용성, 모형의 신뢰성, 사용자의 선호도 등에 따라 좌우되나 사용목적에 부합하는 범위에서 가능한 한 간단한 모형을 사용하는 것이 좋음은 물론이다. 이러한 점에서 STORM 모형은 1977년 HEC에 의하여 개발된 이후 한 번도 수정 버전이 나온 바 없으나 아직도 많은 사람들에 의하여 사용되고 있다. 가장 융통성 있게 사용될 수 있는 모형이며, 현재 가장 널리 사용되고 있는 모형은 SWMM과 HSPF이다. SWMM은 도시 수문/

**표 1. 도시 비점 오염원 수질모형의 비교(Donigian과 Huber, 1991)**

| | HSPF | Statistical | STORM | SWMM |
|---|---|---|---|---|
| 개발기관 | EPA | EPA | HEC | EPA |
| 모의유형 | 연속 및 단일사상 | 해당 없음 | 연속 | 연속 및 단일사상 |
| 모의 수질 항목의 수 | 10 | 제한 없음 | 6 | 10 |
| 강우-유출 해석 | 가능 | 불가 | 가능 | 가능 |
| 하수/우수거흐름 추적 | 가능 | 해당 없음 | 불가 | 가능 |
| 동역학적 추적 방정식의 사용 | 불가 | 해당 없음 | 불가 | 가능 |
| 웨어, 오리피스 등 흐름조절 구조물 | 불가 | 해당 없음 | 포함가능 | 포함가능 |
| 저류분석 | 가능 | 가능 | 가능 | 가능 |
| 처리분석 | 가능 | 가능 | 가능 | 가능 |
| 소형컴퓨터용 전산 모형의 가용성 | 가용 | 가용 | 가용 | 가용 |
| 입력자료의 양 | 많음 | 보통 | 적음 | 많음 |
| 모형의 전반적 복잡성 | 복잡 | 보통 | 보통 | 복잡 |

수리 현상을 매우 상세히 모의할 수 있는 반면, HSPF는 침식, 오염물질간 상호 반응, 지하수 수질 등의 모의 기능을 갖고 있으며, 특히 도시 및 농촌, 점 오염원 및 비점 오염원 등 모든 유형의 토지 이용 및 오염원 유형에 대하여 적용이 가능하다는, 즉 구성이 복잡한 대유역에 대하여 적용할 수 있다는 큰 장점이 있다. 이들 두 모형은 STORM과 비교할 때, 그 규모가 비교적 크지만, 사용자의 목적에 따라 그 중의 일부 기능을 선택적으로 사용할 수 있다. 예를 들면 일정농도법, rating curve 방법 등 간단한 수질모의 방법 또한 SWMM 모형내의 선택 항목으로 제공되어 있다. SWMM 모형은 원래 단일 사상에 대한 상세한 모의 모형으로 개발되어 잘 알려져 있으나 STORM 모형에서 가능한 연속 모의를 위한 거의 모든 기능을 포함하고 있다. 그럼에도 불구하고 연속 모의의 목적으로 모형을 사용할 경우에는 굳이 SWMM 모형을 사용할 필요가 없으며 STORM 모형을 사용할 것을 SWMM 모형의 사용자 지침서(Huber와 Dickinson, 1988)에서는 권하고 있다. 표 1은 STORM, SWMM, HSPF 및 EPA의 통계적 방법을 상호 비교하여 나타내고 있다. 이밖에도 유럽지역에서 개발된 몇몇 모형들이 있으나, 대부분 商用 소프트웨어이기 때문에 그 내용이 문헌들을 통하여 잘 알려져 있지 않으며, 구입을 요한다.

대부분의 수리 수문학적 모형의 경우에 그러하듯이 비점 오염원 수질모델링의 성공적 수행 을 위해서는 양질의 관측자료가 필수적이다. 따라서 모델링 이전에 필요한 자료의 축적을 위한 체계적인 모니터링 과정이 선행되어야 할 것이다.

## 〈참고문헌〉


신현석, 윤용남 (1993). "SWMM 모형을 이용한 도시 유역의 유출 및 NPS 오염물 배출 모의." 한국수문학회지, 제26권, 제3호, pp. 125-135.

이종태, 강태호 (1997). "도시 배수유역의 유출-수질 특성인자의 민감도 분석." 한국수자원학회논문집, 제30권, 제1호, pp. 83-93.

Abbott, J. (1977). "Guidelines for calibration and application of STORM." Training Document No. 8, Hydrologic Engrg. Center, U.S. Army Corps of Engrs., Davis, CA.

American Public Works Association (1969). "Water pollution aspects of urban runoff." 11030DNS01/69, Federal Water Pollution Control Administration, Washington, DC.

Bicknell, B.R., Imhoff, J.C., Kittle, J.A., Jr., Donigian, A.S., Jr., and Johanson, R.C. (1993). "Hydrologic Simulation Program - FORTRAN (HSPF): User's manual for Release 10." EPA/600/R-93-174, Office of Research and Development, U.S. Envir. Protection Agency, Athens, GA.

Brown, R.G. (1984). "Relation between quantity and quality of storm runoff and various watershed characteristics in Minnesota, USA." Proc. Third

Int. Conf. on Urban Storm Drainage, Chalmers Univ. of Technology, Goteborg, Sweden, Vol. 3, pp. 791-800.

Di Toro, D.M. (1984). "Probability model of stream quality due to runoff." J. of Envir. Engrg., ASCE, Vol. 110, No. 3, pp. 607-628.

Di Toro, D.M., and Small, M.J. (1979). "Stormwater interception and storage." J. of Envir. Engrg. Div., ASCE, Vol. 105, No. EE1, pp. 43-54.

Donigian, A.S., Jr., and Huber, W.C. (1991). "Modeling nonpoint source water quality in urban and non-urban areas." EPA/600/3-91-039, U.S. Envir. Protection Agency, Athens, GA.

Dodson (1991). "ProStorm: User's manual and program reference." Document No. 91/007, Dodson & Associate, Inc., Houston, Texas.

Driscoll, E.D., Di Toro, D.M., and Thomann, R.V. (1979). "A statistical method for assessment of urban runoff." EPA 440/3-79-023, U.S. Envir. Protection Agency, Washington, DC.

Heaney, J.P., Huber, W.C., Skeikh, H., Medina, M.A., Doyle, J.R., Peltz, W.A., and Darling, J.E. (1975). "Urban storm water management modeling and decision making." EPA-670/2-75-022, U.S. Envir. Protection Agency, Cincinnati, OH.

HEC (1977). "Storage, Treatment, Overflow, Runoff Model, STORM, Users Manual." Generalized Computer Program 723-S8-L7520, Hydrologic Engrg. Center, U.S. Army Corps of Engrs., Davis, CA.

Howard, C.D.D. (1976). "Theory of storage and treatment-plant overflows." J. of Envir. Engrg. Div., ASCE, Vol. 102, No. EE4, pp. 709-722.

Huber, W.C., and Dickinson, R.E. (1988). "Storm Water Management Model Version 4, User's Manual." EPA/600/3-88/001a, Envir. Protection Agency, Athens, GA.

Lager, J.A., Smith, W.G., Lynard, W.G., and Finnemore, E.J. (1977). "Urban stormwater management and technology: update and user's guide." EPA-600/8-77-014, U.S. Envir. Protection Agency, Cincinnati, OH.

Lahiou, M., Choudhury, S.H., Wu, Y., and K., B. (1995). "SWMM Windows Interface user's manual." EPA-823-B-95-008, U.S. Envir. Protection Agency, Washington, DC.

Loganathan, V.G., and Delleur, J.W. (1984). "Effect of urbanization on frequencies of overflows and pollutant loadings from sewer overflows." Water Resour. Res., Vol. 20, No. 7, pp. 857-865.

Lumb, A.M., McCammon, R.B., and Kittle, J.L., Jr. (1994). "Users manual for an expert system (HSPEXP) for calibration of the Hydrologic Simulation Program-Fortran." Water-Resources Investigations Rep. 94-4168, U.S. Geological Survey, Reston, VA.

Manning, M.J., Sullivan, R.H., and Kipp, T.M. (1977). "Nationwide evaluation of combined sewer overflows and urban stormwater discharges: Vol. 3. characterization of discharges." EPA-600/2-77-064c, U.S. Envir. Protection Agency, Cincinnati, OH.

McElroy, A.D., Chiu, S.Y., Nebgen, J.W., Aleti, A., and Bennett, F.W. (1976). "Loading functions for assessment of water pollution from nonpoint sources." EPA-600/2-76-151, Office of Research and Development, U.S. Envir. Protection Agency, Washington, DC.

Pisano, W.C., and Queiroz, C.S. (1977). "Procedures for estimating dry weather pollutant deposition in sewerage systems." EPA-600/2-77-120, U.S. Envir. Protection Agency, Cincinnati, OH.

Sartor, J.D., and Boyd, G.B. (1972). "Water pollution aspects of street surface contamination." EPA R2-72-081, U.S. Envir. Protection Agency, Washington, DC.

Small, M.J., and Di Toro, D.M. (1979). "Stormwater treatment systems." J. of Envir. Engrg. Div., ASCE, Vol. 105, No. EE3, pp. 557-569.

Tasker, G.D., and Driver, N.E. (1988). "Nationwide regression models for predicting urban Runoff water quality at unmonitored sites." Water Resour. Bull., Vol. 24, No. 5, pp. 1091-1101.