

비점원 오염 모델의 종류와 적용방법



박승우 ▶▶

서울대학교 지역시스템공학과 교수
swpark@snu.ac.kr

비점원(nonpoint source, NPS) 오염물질은 강수에 의한 유출과 토양침식에 의해 오염원으로부터 흘러나와 하천과 호소, 바다로 운송되는 과정에서 물리적, 화학적, 생물학적 기작과 그 상호작용에 의해 생성과 소멸, 확산과 변형 등을 겪는다. 주요 비점원 오염물질에는 유사, 비료성분 (질소, 인), 독성물질 (농약, 제초제), 중금속, 미생물 (대장균) 등을 들 수 있다. 이들 오염물질은 물에 용해되어 흘러나오는 용해성(soluble)과 유사에 부착되어 나오는 유사 부착(sediment-bound) 형태를 갖는다. 그러나 비점원 오염의 발생과 배출, 그 저감대책에 의한 소멸 기작은 매우 복잡하여 그 정확한 정량적 관계가 구명되지 못하고 있다. 따라서 유역에서의 비점원오염량의 추정과 그 저감대책의 효과를 정량적으로 구명하기 위해서는 수학적 모델을 이용해서 나타낼 수밖에 없다.

비점원 오염 모델(NPS pollution model)은 포장이나 유역에서 오염물질의 운송 기작을 수학적 관계를 이용하여 정량적으로 추정하는 도구이다. 비점원 오염 모델에서는 오염원으로부터 수체에 이르기까지 발생과 배출, 유달 과정을 대상으로 하는 것이 보통이다. 하천과 호소 내에서의 오염물의 운송기작은 보다 복잡한 새로운 운송기작에 영향을 받아 별도의 해석이 필요하기 때문이다.

비점원 오염 모델이 본격적으로 개발되기 시작한

것은 1970년대 이후이다. 미국의 수질보전법(Clean Water Act)에서 비점오염의 관리를 정의한 것에 맞추어 여러 비점원 오염 모델이 연구 개발되었으며, 1980년대에 현재 이용되고 있는 대부분의 모델이 완성된다. 1990년대 이후 지리정보시스템(Geographic Information System, GIS)의 응용과 오염총량제의 실시 등에 따라 도시 및 농촌유역에서의 비점원오염의 추정과 관리방안에 따른 발생량과 배출량의 저감을 계량화하는 도구로서 발전되었다.

다음에서는 비점원 오염 모델의 종류와 그 특징을 살펴보고, 어떻게 적용하는가를 고찰하기로 한다.

1. 비점원 오염모델의 구분

비점원오염 모델은 대상오염물질의 운송기작의 모의수준에 따라 1등급(Level 1)부터 5등급(Level 5)까지 나눌 수 있다(Novotny and Olem, 1994). 1등급은 가장 단순한 통계적 추정방법이며 등급이 높아질수록 더 높은 수준의 기법을 적용한 것으로 본다. 물론, 어떤 모델에 엄정하게 등급을 매기는 일이 쉽지 않을 것이나, 통상적으로는 유출순환과정과 비점원 오염물질의 운송기작을 고려하는 정도에 따라 구분하고 있다.

비점원오염 모델은 스크린 모델(screen model)과 시뮬레이션 모델(simulation model)로 구분하기도 한다. 등급 I, II는 스크린 모델, 등급 III~V는 시뮬레이션 모델에 해당한다. 또한, 그 모형의 적용 대상지역과 수문사상을 중심으로 도시 모델(urban model), 농업 모델(agricultural model)로 나누며, 홍수사상 모델(storm event model)과 연속 모델

(continuous model)로 구분한다. 또한 모델의 적용 범위에 따라 포장모델 (field-scaled model)과 유역 모델 (watershed model)로 나눈다. 포장 모델은 하나의 토지이용 조건 혹은 수문단위를 대상으로 하며, 유역모델은 두개 이상의 포장 조건을 모의할 수 있는 경우이다.

2. 원단위법 (Unit Load Method)

원단위법은 오염물질의 토지이용별 단위 면적당 부하율을 통계적으로 추정하여 이 값에 면적 또는 오염원수를 곱하여 부하량을 구하는 방법으로, 등급 I, II의 수준의 스크린 모델을 말한다. 오염원수에 단위 부하량 (unit load)을 곱하여 발생부하량 (generating load)을 구하는 방법으로 현재 실무에서 널리 이용되고 있다.

원단위법의 정확도는 부하율에 따라 좌우되므로, 장기간 오염물질 부하량의 측정결과를 바탕으로 부하율을 얻는다면 오차를 최소화할 수 있다. 그러나 비점원 오염물질의 운송기작은 단순히 토지이용에 따른

함수가 아니며, 강우-유출기작과 토양침식과정에 좌우되므로 이 방법에 의한 추정결과는 통계적 값 이상의 의미를 갖지 못한다. 원단위법과 유사한 수준의 추정방법을 스크린 모델이라고 부르는 것은 이들 방법을 적용하여 오염물질 부하량의 공간적 변화 정도를 비교할 수 있기 때문이다. 스크린 모델로부터 특정수준이상의 오염원을 정의한다면 적절한 저감대책을 강구함으로써 오염물질 배출량을 관리하는데 응용할 수 있다.

3. 시뮬레이션 모델 (Simulation Model)

비점원 오염물질은 강우-유출과정에 따라 원래 위치로부터 탈리(脫離, detachment)되어 유출과 함께 운송되기 시작한다. 유출이 없으면 오염물질은 배출되지 않는다. 도시지역의 합류식 하수관로시스템은 물론이고 농경지에서의 관개로 인한 배수의 경우에도 유출에 의하여 오염물질이 배출된다. 지하수로부터 기저유출과 함께 오염물질이 하천으로 유입되기도 한다. 결국 비점원 오염물질의 운송은 유출순환기작과

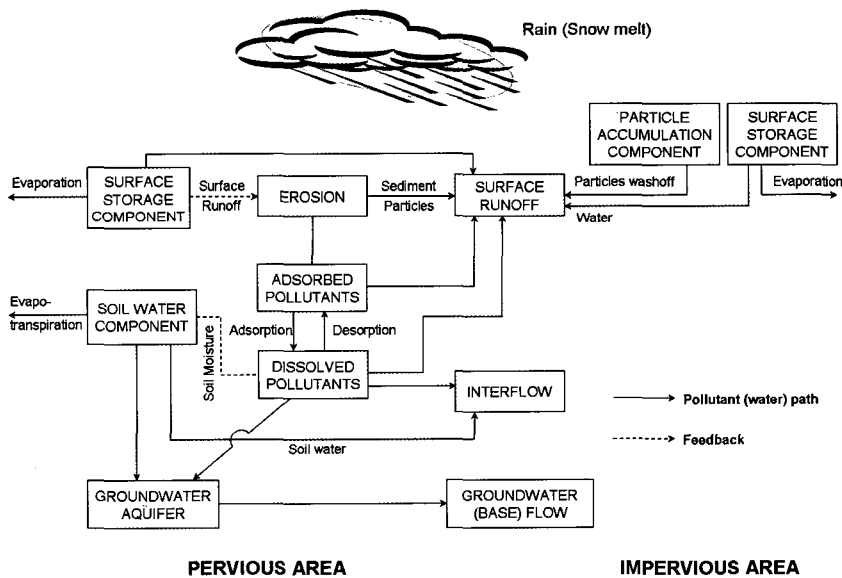


그림 1. 유출순환-토양침식-비점원 오염물질 운송의 상호관계

밀접한 관계를 가진다.

비점원 오염물질은 토양침식과도 밀접한 관계를 갖는다. 강우와 지표유출에 의한 토양침식은 위치별 지표월류의 수리학적 특성과 밀접한 관계를 갖는다. 유량이 증가할수록, 경사도가 클수록 유사 운송력(sediment transport capacity)이 커지며 유실량도 증가한다. 이상의 유출순환과 토양침식, 비점원 오염물질의 운송기작의 상호관계를 도식적으로 나타내면 그림 1과 같다.

비점원 오염 모델은 그림 1과 같이 비점원 오염 운송기작을 수학적 관계로 표시하여 시뮬레이션 하는 도구이며, 모델의 목적이나 적용범위 등에 따라 그 시뮬레이션의 내용과 범위 등에서 다양한 수준으로 개발되었다. 편의상 비점원 오염 모델의 적용 목적에 따라 도시 모델과 농촌 모델로 구분하여 그 특징을 살펴보도록 한다.

3.1 도시 비점원 오염 모델

도시 비점원 오염 모델 (도시 모델, urban model)은 불투수지역의 지표유출과 합류식 하수관로 유출수(combined sewer outflow, CSO)에 의한 오염물질의 발생, 운송, 배출을 추정하도록 구성한 것을 말한다. 도시 모델의 예로는 STORM (Hydrologic

Engineering Center, 1975), SWMM (Huber and Dickinson, 1988), DR3M-QUAL (Alley and Smith, 1982), ILLUDAS (Terstriep and Stall, 1974) 등이 있다.

STORM (Storage-Treatment Overflow-Runoff Model)은 미국 공병단에서 개발된 비교적 단순한 도시유출-비점원 오염 모델이다. 강우에 의한 지표유출을 추정하고 오염물질의 배출량을 모의하는 모델이다. SWMM (Storm-Water Management Model)은 미국 환경청에서 개발한 모델로서 도시지역의 비점원 오염 모델로서는 세계적으로 가장 널리 쓰이고 있다. SWMM의 구성은 그림 2와 같다. 원래는 폭우사상에 대한 유출과 오염물질 배출기작을 모의하도록 개발되었으나, Version 4로부터 연속모의가 가능하도록 발전되었다.

그 밖의 여러 가지 도시모델이 있으나 연구개발단계에 머물고 있어 일반 사용자들이 쓰기에는 아직 충분한 자료 등이 제공되지 못하는 경우가 많다. 비점원 오염 모델 중 사용자 지침서가 있거나 일반 사용자들이 소프트웨어의 접근이 용이하여 소위 적용 가능한 모델을 운영모델 (operational model)이라고 한다. 대표적인 운영모델의 예는 참고문헌 등에서 찾을 수 있다 (Novotny and Olem, 1994).

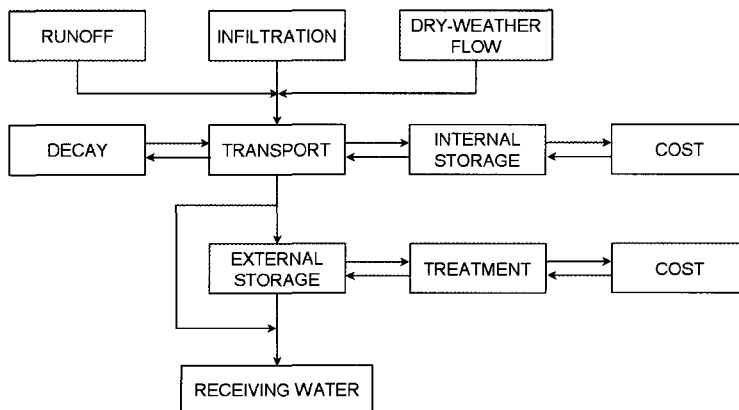


그림 2. SWMM 모델의 개요

3.2 농촌 비점원 오염 모델

도시 모델의 경우도 농촌에서의 비점원 오염 운송 기작을 포함하는 경우가 많다. 그러나 다양한 토지이용과 영농방법을 나타내기 위한 충분한 매개변수를 고려하지 않거나, 농업최적관리기법 등에 따른 오염물질의 저감 등의 기작이 충분히 고려되지 않은 경우가 많다. 도시지역의 특징인 CSO에 대하여 고려하지 않는 모델은 농촌 비점원 오염 모델 (농촌 모델 혹은 농업 모델, rural model)로 구분할 수 있다. 농촌 모델에서는 토양 침식 기작이 중요하게 고려되는 것이 보통이므로, 이러한 기준으로 농촌 모델의 특징을 살펴보기로 한다.

농촌 모델은 농경지, 초지, 임야지 등의 경사지와 수로, 저류지 등에서 수문, 토양 침식, 오염물질의 운송 기작을 모사하도록 개발되었다. 이들 모델은 단순한 토지이용 상태를 고려하는 포장 모델 (field-scaled model)과 두개 이상의 토지이용 상태에도 적용 가능한 유역 모델 (watershed model)로 구분된다.

포장 모델의 대표적인 것은 미국 농무성에서 개발한 CREAMS (Chemical, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems) (Knisel, 1980)가 있다. CREAMS는 유출곡선법을 이용하여 일강우로부터 비롯되는 비점원 오염물질의 거동을 모사하는 경우와 침투식을 적용하여 시우량 (時雨量)으로부터 유출량 수문곡선을 모사하여 이에

다른 오염물질을 추정하는 데도 적용 가능하다. CREAMS의 응용 모델로는 지하수 유동을 모사할 수 있는 GLEAMS (Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems)와 서울대에서 개발한 논에서의 비료물질 거동해석을 위한 CREAMS-PADDY (진영민 등, 1998) 등이 있다. 그림 3은 CREAMS-PADDY를 이용하여 시기별 논물의 총질소 변화를 시뮬레이션 결과를 보여준다.

WEPP (Water Erosion Prediction Project) (Foster and Lane, 1987)은 토양유실량식 (Universal Soil Loss Equation, USLE)을 이용한 토양유실량 추정방법을 개선한 것으로 토립자의 탈리, 운송, 퇴적을 고려하여 경사지로부터 토양유실량을 추정할 수 있도록 하였다. WEPP은 일 강우에 대한 토양유실량을 모의하고 이를 작물생육기간에 대하여 적산하는 방식이며, 기후자료를 생성하는 모듈을 적용, 미국의 모든 지역에 대한 토양유실량의 추정이 가능하도록 개발되었다.

유역 모델은 폭우사상 모델과 연속 모델, 분포형 모델과 총괄형 모델 등으로 대별된다. 총괄형 모델 (lumped model)은 유역 내 수문단위나 오염원 등의 공간분포를 고려하지 않는 경우이며, 분포형 모델 (distributed model)이란 장방형 격자나 삼각형 등으로 유역을 세분하고 각 격자 또는 요소에 대하여 수문과 토양침식, 비점원 오염 운송기작을 고려하는 것을 말한다. 분포형 모델에는 시간별 유출수문곡선

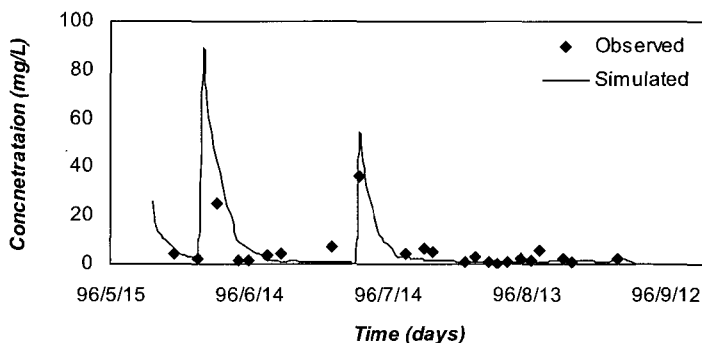


그림 3. CREAMS-PADDY를 이용한 시기별 논물의 총질소 변화 모의결과

과 이에 수반되는 토양침식과 운송, 오염물질 등의 거동을 모의할 수 있는 ANSWERS (Beasley, 1980), SCS 유출곡선법을 이용하여 일유출량과 침투 유량을 추정하고 이를 바탕으로 토양침식, 오염물질의 총량을 추정할 수 있도록 미국 농무성에서 개발된 AGNPS (Agricultural Nonpoint Source Pollution model) (Young et al., 1986)이 대표적이라 할 수 있다. AGNPS를 연간 일 강수량에 대하여 적용 가능하도록 구성한 것이 AnnAGNPS인데, 이 모델은 AGNPS를 연속적으로 모의하는 것이다.

AGNPS는 USLE를 이용하여 토양유실량을 얻고, 유역의 격자망에서 유로방향을 고려하여 침투유량으로부터 유사운송을 모사하여 오염물질 배출량을 추정하는데, 입력자료가 물리적으로 정의 가능하도록 구성한 것이 특징이다. 따라서 격자별 오염물질의 발생량과 배출량을 모사해 주기 때문에 다양한 관리대안 또는 최적관리기법을 적용하는 데 유리한 모델이다. 그림 4는 AGNPS의 응용 예로서 격자망을 이용한 유출수의 배출경로를 나타내주고 있다.

연속 모델은 분포형 모델보다는 소유역별 총괄형 모델 (lumped model)을 통합하는 형태로 구성된 것이 보통이다. 따라서 연속 모델에서는 유역을 토지이용, 지형조건 등의 특성에 따라 몇 개의 소유역으로

구분하고 각 소유역별로 총괄적인 입력자료를 구축하는 방식이다. 소유역내 미세한 지형이나 토지이용의 변화는 무시하고 평균적인 매개변수를 적용하게 되는데, 이론적으로는 오염물질 운송기작을 적절하게 모사하기 어렵다고 할 수 있으나 실제로는 미세한 변화에 따른 유출, 토양침식 및 오염물질 등의 거동을 나타내는 데는 무리가 없다고 알려져 있다.

연속 모델의 대표적인 것에는 SWAT와 HSPF가 있다. SWAT (Soil and Water Assessment Tool)이 앞서 언급한 농업 모델들과는 다른 특징을 갖는 것은 토양유실량 추정방식에 있다. USLE, WEPP, AGNPS 등에서는 강우침식인자 (rainfall erosivity factor)라고 하는 폭우사상의 강우에너지 (E)와 30분 최대강우강도 (I30)의 곱인 EI30값 대신에 유출침식인자 (runoff erosivity factor)를 적용하는 것이다. SWAT-K (한국건설기술연구원, 2006)의 beta 버전이 개발 발표하였으며 앞으로 국내 비점원오염 모델로 활용될 것으로 생각된다.

HSPF (Hydrologic Simulation Program-FORTRAN)은 1960년대 개발된 유역수문시물레이션 모델인 Stanford Model과 이를 농업유역에 적용하도록 구성한 ARM (Agricultural Runoff Model)을 모태로 하여 도시비점원 모사를 포함하여

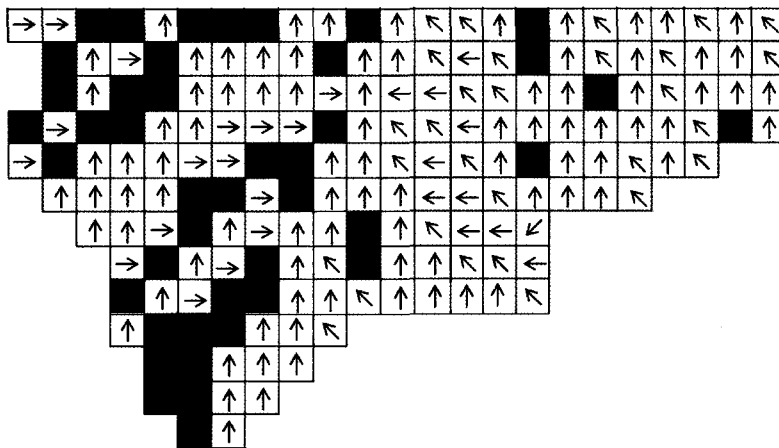


그림 4. AGNPS 격자망과 유출방향의 예

발전된 모델이다. HSPF는 하천수질모델을 포함하고 있어 유역모델로서 적용 가능성이 높은 모델로 평가되기도 한다. 여러 기능을 포함하는 대형 수문 모델에서와 같이 HSPF에서도 여러 모듈로 구성된 것이 특징이다.

4. 비점원 오염 모델의 적용

비점원오염 모델의 적용 방법은 수문 모델 등의 적용과 크게 다르지 않다. 다만 수문모델에 비하여 입력자료가 훨씬 많은데, 이는 비점원 오염 모델은 수문 모델에 토양침식 모델과 물질 운송 모델을 결합한 형태이기 때문이다. 또한 여러 가지 관리대안에 따른 저감효과를 평가하기 위한 모듈들이 포함되어 있다. 따라서 모델의 입력자료를 수집, 정리하는 데는 많은 노력이 필요하다. GIS를 이용하여 입력자료를 수집하는 것이 일반적이며, 이를 위한 결합 모듈이 많이 개발되어 있다.

모델의 적용은 입력자료의 구축, 매개변수의 보정과 검증, 그리고 모델의 응용 단계로 나뉜다. 다음은 각 적용 단계를 간략히 살펴보기로 한다.

4.1 입력자료의 구축

모델의 입력자료는 사용자 지침서나 기존 적용사례 등을 기초로 가능한 자료를 수집하여 정리해야 한다. 이때 모델은 대부분 물리적 매개변수를 적용하므로 지형, 토양, 토지이용 및 수문학적 조건을 감안하고 영농방법 및 시비량 등의 자료를 정리한다. 유역 모델의 경우, 오염관리대책을 고려하여 소유역을 구분하는 것도 필요하다. 매개변수 중에는 물리적 의미보다는 경험적 성격을 갖는 경우도 있다. 예를 들어 Manning 조도계수의 경우에도 물리적으로는 유로의 특징과 하상물질 등에 의하여 정의할 수 있으나, 실재는 소유역 또는 격자 내의 물리적 조건의 평균에 해당하므로 보정이 필요한 경우도 많다.

4.2 모델의 보정

모델은 유역에서 강우-유출에 의한 비점원 오염물질의 운송기작을 수학적으로 모사하는 도구이므로, 주어진 입력에 대하여 출력이 실제 유역의 반응과 같도록 해줘야하는 데 이 단계를 모델의 보정(model calibration)이라고 한다. 모델의 보정은 대상 유역의 강우, 유출, 비점원 오염 배출량 등 자료가 있는 강우사상이나 연강우량 계열을 선정해야한다. 만약 자료가 없는 미계측유역의 경우는 가급적 토지이용이 유사한 인접한 계측 유역을 선정하여 적용해볼 수 있다. 강우사상이나 일강우량 계열을 선정할 때는 갈수, 평수, 홍수 등을 포함하여 최소 3~4 폭우사상이나 연도를 고려하는 것이 보통이다.

매개변수 보정은 여러 가지 방법이 있으나 가장 간단한 예를 고려해보기로 한다. 우선 물리적 매개변수 자료를 중심으로 구성된 입력자료를 이용하여 모델을 구동하여 출력자료를 얻고 이를 관측치와 비교한다. 관측치와 모사결과가 유사하거나 혹은 일정수준의 오차범위 이내이면 매개변수가 보정된 것으로 간주할 수 있을 것이다. 만약 출력 값의 오차가 클 경우는 매개변수 중 보정 대상을 선정하고 그 값을 변화시켜가면서 새로운 출력을 얻고 그 오차를 검토해가는 것을 반복하여 허용오차 수준이내가 되도록 하는 것이다. 또한 최적화기법 (optimization technique)을 적용하면 보다 쉽고 빠르게 모델의 보정이 가능하다.

4.3 모델의 검증

모델의 검증 (model validation)은 보정된 매개변수를 입력자료로 써서 보정에서 적용하지 않은 자료 (미계측 조건)를 이용하여 추정 오차를 검토하는 단계이다. 실측치와 모델을 이용한 추정치와의 오차를 나타내는 데는 여러 가지 통계변량을 쓰기도 한다. 수문모델은 유출량과 침투유량, 수문곡선 등 2~3개의 속성을 갖는 자료를 대상으로 하는 것과는 달리, 비점원 오염 모델은 많은 항목을 비교해야하고, 각 항

목이 서로 다른 추정 정도를 갖는 것이 보통이다. 따라서 모델의 보정이나 검증에서 오차범위 이내에서 적합한지 평가하는 데 어려움이 따르기도 한다. 따라서 평균오차, 상관계수, 모델의 효율계수 등 여러 가지 통계변량을 활용하는 것이 필요하다.

4.4 모델의 적용

매개변수 보정과 검정을 마치면, 목적하는 업무에 대하여 모델을 적용하게 된다. 예를 들어, 장기간의 비점원 오염물질 배출량을 시뮬레이션 한다든가, 여러 가지 다양한 관리대안에 따른 배출량의 변화를 파악하거나 최적관리기법을 선정하는 등을 시도할 수 있다. 이와 같은 일은 모델의 적용 (model application)이라고 한다.

그림 5는 AGNPS를 이용하여 만경강 상류 소양천 유역에서의 여러 가지 관리 시나리오에 따른 유사량, 총질소와 총인의 배출량 변화를 비교한 결과이다. 관리대안에 따라 오염물질별로 나타나는 효과가 다른 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과를 바탕으로 비점원 오염 저감대책 중 가장 타당한 방안을 채택할 수 있을 것이다. 때로는 소유역별 오염물질 배출량을 분배하거나 최적관리기법의 선정을 위해 최적화기법을 쓰기도 한다. 즉 다양한 관리대안의 조합 중에서 비점원 오염관리 목표에 가장 근접하면서도 경제적으로 적용 가능한 대안을 선정하는 경우이다.

5. 맺음말

이상에서 비점원오염 모델의 대강을 살펴보고 그 주요 특징과 적용에 대하여 논의해보았다. 물론 여기에서 소개된 것 이외에도 많은 비점원오염 모델이 응용되고 있다. 모델의 응용에서도 GIS의 적용, 사용자 편의시스템의 개발 등이 활발하게 이루어지고 있다. 모델은 서로 다른 오염물질 운송기작을 갖거나, 각각의 적용 대상이나 범위가 다른 경우도 있다. 때로는 모델의 추정결과가 서로 다른 경우도 있다. 따라서 어떤 모델을 선정하여 적용할 것인가에 대한 논의는 쉽지 않은 과제가 되고 있다.

참고문헌

- 진영민, 1998. 논외 비점오염물질 배출량 추정을 위한 CREAMS-PADDY 모형의 개발, 서울대학교 석사학위논문.
- 한국건설기술연구원, 2006. 지표수 수문성분 해석모형 개발 보고서, 수자원의 지속적 확보기술 개발사업(2-2-2).
- Alley, W. M. and P. E. Smith, 1982. Distributed routing rainfall-runoff model-version II: U.S. Geological Survey Open-File Report 82-344.

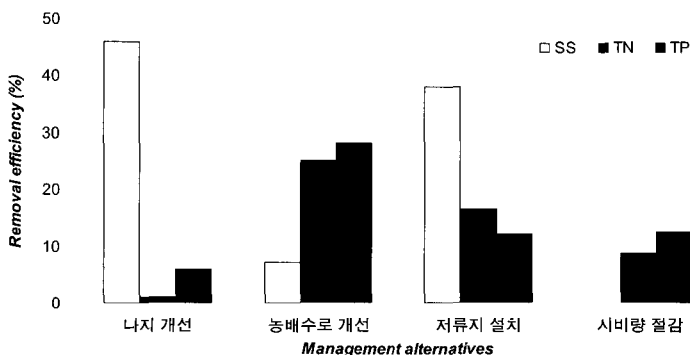


그림 5. 여러 가지 관리대안에 따른 유사량 및 총질소, 총인의 배출량 변화 비교

- Beasley, D. B., L. F. Huggins and E. J. Monke, 1980. ANSWERS: A model for watershed planning, Transactions of the American Society of Agricultural Engineers 23(4), pp. 938-944.
- Huber, W. C. and R. E. Dickinson, 1988. Storm Water Management Model, Version 4, User's Manual, EPA/600/3-88/001a (NTIS PB88-236641/AS), U.S. EPA, Athens, GA, 30605.
- Hydrologic Engineering Center, 1975. Urban Storm Runoff-STORM, U.S. Army Corps of Engineers, Davis, CA.
- Knisel, W. G., ed., 1980. CREAMS: A field-scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems, Conservation Report 26, USDA-SEA, Washington, D.C.
- Novotny, V. and H. Olem, 1994. Water quality -Prevention, Identification, and Management of Diffuse Pollution, Van Nostrand Reinhold, New York.
- Terstriep, M. L. and J. B. Stall, 1974. The Illinois Urban Drainage Area Simulator, ILLUDAS, Illinois State Water Survey Bulletin No. 58.
- Young, R. A. et al., 1986. Agricultural Non-point Source Pollution Model: A Watershed Analysis Tool, Agricultural Research Service, USDA, Morris, MN. 