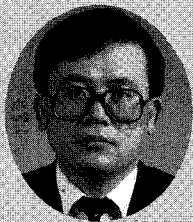


하천 모델의 원리와 활용방법

〈1〉



朴錫淳

(강원대학교 자연대 환경학과 부교수)

목차

- I. 서론
 - 1.1 STREAM모델 연구 배경
 - 1.2 STRESS모델 연구 배경
 - 1.3 모델 개요
- II. 모델 원리
 - 2.1 반응조 나열법
 - 2.2 STREAM모델식
 - 2.3 STRESS모델식
- III. 수질인자 반응 및 상호관계
 - 3.1 분변성 세균
 - 3.2 비보존성물질
 - 3.3 보존성 물질
 - 3.4 질소 화합물
 - 3.5 인 화합물
 - 3.6 염류소 a
 - 3.7 생물화학적 산소요구량
 - 3.8 용존산소
 - 3.8.1 보에 의한 재포기
 - 3.8.2 재포기 계수
 - 3.9 무작위 수질 반응식
- IV. 입력 화일 구성
 - 4.1 하천의 구조화
 - 4.2 결정 모델 입력 화일 작성
 - 4.3 실측 데이터 화일 작성
 - 4.4 확률 모델 입력 화일 작성
 - 4.4.1 기초 입력 화일
 - 4.4.2 확률 입력 화일
- V. 수행 절차
 - 5.1 STREAM모델
 - 5.1.1 프로그램 개요
 - 5.1.2 수행과정
 - 5.2 STRESS모델
 - 5.2.1 프로그램 개요
 - 5.2.2 수행과정
- VI. 참고문헌

I. 서론

환경모델(Environmental Model)은 자연계에서 일

어나는 다양한 오염물질의 이동, 확산, 변화 과정, 그리고 영향을 물리화학 및 생물학적 원리에 기초하여 개념화, 정량화, 수식화 또는 전산화한 것이다. Streeter and Phelps(1925)가 하천의 생물화학적 산소요구량과 용존산소 변화를 최초로 모델한 이래 지금까지 하천, 하구, 호수, 생물상, 토양, 지하수, 대기, 소음에 이르기까지 많은 환경모델들이 개발되어져 왔다. 특히 1980년대 이후 컴퓨터 전산능력의 발달로 환경모델은 점점 복잡화, 다양화되고 있다.

환경모델은 모델하고자 하는 대상, 즉 실체(Prototype; Real System)와 오염물질에 따라 모델 구성이 달라지며, 요구되는 정밀도와 전산 능력에 따라 적절한 요약화(Abstraction) 및 단순화(Simplification)과정을 거쳐 주어진 환경의 오염물질변화에 적합한 모델이 개발되어 진다. 환경모델을 통하여 대상지역의 오염물질 변화과정을 설명할 수 있으며, 새로운 오염물질 유입으로 인한 장래의 변화를 예측하고 그 지역의 자정능력을 산출하여 배출허용량을 결정함으로써 합리적 환경 관리 대책을 수립할 수 있다. 또한 어떠한 인자가 오염물질의 변화에 주요한 영향을 미치는가를 정량적으로 산출할 수 있을 뿐만 아니라 미지의 새로운 영향인자를 찾아낼 수 있다.

본 기술 강좌를 통하여 최근 한국과학재단의 연구지원으로 국내 하천의 특성에 적합하게 개발된 STREAM(Segment Travel River Ecosystem Autograph Model) 모델과 STRESS(Segment Travel River Ecosystem Stochastic Simulation)모델의 원리와 활용 방법을 소개하고자 한다.

1.1 STREAM모델 연구 배경

Streeter and Phelps(1925)의 선구자적 연구 이후로 많은 하천 모델들이 개발되어졌다. 개발된 대부분의 모델은 Streeter와 Phelps가 제시한 수중 유기물산화(BOD:Biochemical Oxygen Demand)와 포기과정(Reaeration)에 따른 수중 용존산소(DO:Dissolved Oxygen)변화에 주요점을 두고 모델 변형을 시도하였다. Thomas(1948)는 수중 유기물(BOD)변화기작에서 산화과정에 침전을 첨가하였으며, O'Connor(1962)는 확산(Dispersion)에 의한 물질이동을 고려하였다. 또한 Camp(1963)는 침전물로부터의 유기물의 재부유과정(Resuspension)과 수중식물의 광합성에 의한 용존산

소 증가가 첨가되었다. O'Connor and DiToro(1968, 1970)는 광합성에 의한 산소생산을 사인곡선 반주기(Half-Cycle)의 Fourier Series를 이용하여 일주 변화를 나타내고 질소 산화 산소요구량(NOD: Nitrogenous Oxygen Demand)과 침전물 산소요구량(SOD: Sediment Oxygen Demand)를 용존산소 변화에 포함시켰다. 이러한 단순 수식모델에 기초를 두고, 새로운 전산모델의 개발이 1970년 TWDB(Texas Water Development Board)에 의해 시도되었다. 여기서 개발된 DOSA-GI모델은 유량과 온도조건의 다양한 변화하에서 DO 농도변화를 쉽게 계산할 수 있으며, 포기과정(Reaeration), BOD, 그리고 NOD를 변화기작으로 포함하였다. 이와 동시에 TWDB의 지원으로 f.D. Masch and Associate(1970)가 QUAL-I모델을 개발하였으며, BOD, DO, 보존성물질, 온도 등의 변화를 계산할 수 있게 하였다. QUAL-I 모델은 1차원 수치모델(Numerical Model)로써 점오염원(Point Source)과 비점오염원(Nonpoint Source)에 의한 영향을 모두 포함할 수 있다.

하천오염 현상이 다양화됨에 따라 그때까지 유일하게 다루어졌던 용존산소외에 암모니아 독성, 병원성 미생물, 부영양화, 그리고 수중생물의 역할 등이 하천 모델에 포함되어야 하였다. 이러한 다인자 하천 생태계 모델(Multiconstituent River Ecosystem Model)이 미연방환경처(USEPA:United States Environmental Protection Agency)의 지원으로 Water Resources Engineers, Inc.(1973)에 의해 QUAL-II라는 이름으로 처음 개발되었다. QUAL-II의 예측 수질 항목은 보존성 물질, 부유조류, 암모니아성질소, 아질산성질소, 질산성질소, 총인, 생화학적 산소 요구량, 용존산소 그리고 분변성세균 등이다. 그러나 QUAL-II는 수질변화 기작에서 몇가지 단점이 제시되었고 이를 보완하여 USEPA에서 QUAL2E를 개발하였다. (Brown and Barnwell, 1985). QUAL2E는 하천 수질 변화 기작에서 중요한 역할을 하는 유기질소 변화 과정과 조류성장에서 영양물질로 암모니아 흡수를 첨가하고 총인을 유기인과 용존무기인으로 분리하였으며 Personal Computer에 이용가능하게 개발되었다.

이상에서 약술한 바와 같이 하천 모델은 BOD와 DO의 단순한 변화과정에서 발전되어 다양한 수질변화모두를 포함하게 되었으며, 하천에서 일어나고 있는 변

화기작 대부분을 포함하였다. 현재 국내는 물론 외국에서도 하천 모델로 QUAL2E가 널리 이용되고 있다. 그러나 QUAL2E 모델은 수초나 부착조류에 의한 용존 산소 변화와 부유조류 사멸시 발생하는 유기물(BOD) 그리고 오염된 하천에서 많이 일어나고 있는 탈질화(Denitrification) 과정이 포함되지 않아 수질변화에 이들의 영향이 크게 작용하는 하천에 적용하는데 한계가 있다(Park and Uchirin, 1990). QUAL2E는 수치모델(Numerical Model)이기 때문에 수량이 적고 오염원이 많은 하천에서 실행에 어려움이 있으며 우리나라 하천은 비교적 경사가 급하고 유속이 빠르기 때문에 여기에 적절한 모델 기법으로 하천 모델이 개발되는 것이 필요하였다.

1.2 STRESS 모델 연구 배경

하천에서 일어나는 오염물질 변화 현상을 이해하고 분석하기 위해 지금까지 많은 수리모델(Mathematical Model)들이 개발되어져 왔다. 개발된 대부분의 모델들은 수체에서 일어나는 복잡한 현상들을 수학적 분석 기법으로 단순화하여 수리적 함수로 표현하며 함수에 내포된 독립변수에 주어진 일정한 값에 따라 결정된 일정한 종속변수값(Deterministic Value)을 산출하는 결정론적 모델(Deterministic Model)이다. 즉, 결정론적 모델의 결과 값은 모델의 수리함수에 포함된 변화 기작에만 의존되며 주어진 상황에서는 항상 일정하다. 그러나 실제 하천에서 일어나는 오염물질 변화 현상은 자연의 무작위적 현상(Random Phenomena)으로 인하여 결정론적 모델이 제시하는 결과값처럼 항상 일정하지 않다.

하천에 결정론적 모델을 적용할 경우 실제(Real System)와 근접한 결과를 산출할 수 있으나 자연의 무작위 현상으로 인하여 많은 오차를 가지게 된다. 따라서 하천 오염원 변화가 예상될때 하류에서 나타나는 수질 변화를 적절히 표현하기 위해서는 자연의 무작위 현상이 고려된 수질 변화 시뮬레이션이 필요하며 이를 근거로 안전한 오염 부하량을 결정하여야 한다. 특히 미세한 농도의 차이로 인하여 자연생태계와 인체에 대한 유무해가 결정되는 수질의 기준치 초과 가능성을 판단하기 위해 모델을 사용할 경우, 예측결과 값에 대한 오차범위를 파악하는 것이 요구된다.

지난 10년간 자연의 무작위 현상에 따른 수질변화를

하천에 결정론적 모델을 적용할 경우 실제(Real System)와 근접한 결과를 산출할 수 있으나 자연의 무작위 현상으로 인하여 많은 오차를 가지게 된다. 따라서 하천 오염원 변화가 예상될때 하류에서 나타나는 수질 변화를 적절히 표현하기 위해서는 자연의 무작위 현상이 고려된 수질 변화 시뮬레이션이 필요하며 이를 근거로 안전한 오염 부하량을 결정하여야 한다.

예측하기 위하여 확률모델(Stochastic Model)개발이 시도되어졌다. 확률모델 개발에 가장 일반적으로 사용되는 기법은 몬테 카를로 기법(Monte Carlo Technique)으로 무작위 현상을 난수 발생에 따라 반복 시뮬레이션하여 표현하는 방법이다. 몬테 카를로 기법은 예측 결과의 확률분포 및 신뢰구간을 제시하여주는 반면 오랜 컴퓨터 시간을 소요하는 단점이 있다. 다른 한 가지 방법으로 일차함수 오차분석법(First Order Error Analysis)이 있다. 이 방법은 신뢰구간을 계산함에 있어 계산 시간을 크게 줄였으나 예측값의 확률분포를 제시하지 못하는 단점이 있다. 두 방법 모두 결정론적 기본식에 포함된 독립 변수에 변이(Variation)를 입력하여 예측수질의 분포를 산출한다. 최근 미연방 환경처에서 결정론적 하천 수질모델 QUAL2E(Enhanced Stream Quality Model)의 기본식에 위에 제시된 두 방법을 적용하여 자연하천의 불확실성 분석이 가능한 QUAL2E-UNCAS(Enhanced Stream Quality Model-Uncertainty Analysis)를 개발하여 현재 활용되고 있다.(Brown and Barnwell, 1987.)

STRESS(Segment Travel River Ecosystem Stochastic Simulation) 모델은 STREAM(Segment Travel River Ecosystem Autograph Model)모델에 몬테 카를

로 기법을 적용하여 개발한 하천 확률 모델이다. STRESS모델은 하천의 무작위 현상을 시뮬레이션하고 결과를 통계 분석하여 출현가능 농도, 신뢰구간, 확률 분포 등을 계산한다. STREAM모델은 입력자료가 비교적 적고 시뮬레이션에 적은 노력과 시간이 드는 장점이 있는 반면 예측 결과가 결정론적 단일 값이 제시되며 STRESS모델은 입력자료, 시간, 노력이 많이 드는 반면 자연의 무작위성을 표현하여 주기 때문에 매우 신뢰성이 있다. 우리나라 하천의 경우 계절에 따른 강우량의 변화가 크고 오염물질이 불규칙하여 수량과 수질의 무작위성이 높게 나타나고 있다. 따라서 예측 결과에 대하여 높은 신뢰성이 요구되는 경우 확률 모델의 적용이 필요하다.

1.3 모델 개요

STREAM은 반응조 나열법(CIS: Cell-In Series)에 기초한 결정론적 모델(Deterministic Model)이며 STRESS는 STREAM의 모델 구조에 몬테 카를로 기법(Monte Carlo Technique)을 적용하여 자연계에서 나타나는 무작위 현상(Random Phenomena)을 시뮬레이션하는 확률모델(Stochastic Model)이다. 두 모델 모두 정상상태를 가정한 일차원 하천 수질모델이며 시뮬레이션에 필요한 입력 데이터를 화일로 정의하고 있다. 모델에는 비점오염원, 점오염원, 바닥으로부터의 용출, 외부 유입 및 유출에 관계된 수질변화 영향인자를 포함하고 있다. STREAM과 STRESS는 다인자 하천 생태계 모델(Multiconstituent Stream Ecosystem Model)로서 다음 15개의 수질인자의 상호관계 및 변화관계를 시뮬레이션할 수 있다. 1) 용존산소(Dissolved Oxygen), 2) 생물화학적 산소 요구량(Biochemical Oxygen Demand), 3) 엽록소 a(Chlorophyll a), 4) 유기질소(Organic Nitrogen as N), 5) 암모니아성 질소(Ammonia as N), 6) 아질산성질소(Nitrite as N), 7) 질산성 질소(Nitrate as N), 8) 유기인(Organic Phosphorus as P), 9) 용존인(Dissolved Phosphorus as P), 10) 분변성 세균(Coliforms), 11) 비보존성 물질 3가지(Three Arbitrary Nonconservative Constituent), 그리고 12) 보존성물질 2가지(Two Conservative Constituents).

STREAM과 STRESS모델은 퍼스널 컴퓨터의 주 기억장치의 용량한계로 인하여 하천을 재현하는데 다 환경관리인. 1993. 4

음과 같이 제약조건을 가지고 있다.

○ 하천의 동일한 구간으로 정의되는 총 구간수(REACH NUMBER) : 30

○ 한개의 구간에 포함될 수 있는 반응조의 총 갯수 : 20

○ 모델시작점의 수 : 1

○ 총 유출입 지류의 갯수 : 50

○ 총 댐의 갯수 : 50

본 모델은 512KB이상의 주 기억장치를 가진 일반 PC에서 쉽게 수행될 수 있으며 Quick Basic언어로 프로그래밍되었다.

II. 모델 원리

2.1 반응조 나열법

지금까지 하천은 일반적으로 물질수지원리(Mass Balance Principle)에 기초한 확산 플럭 흐름계(Plug Flow System with Dispersion)로 모델되어졌다(Brown and Barnwell, 1985). 이러한 확산 플럭 흐름계는 자연계에서 일어나는 반응을 모두 포함할 때 계산과정이 복잡하여 일반적으로 수치 해법(Numerical Solution)을 사용하게 된다. 이렇게 개발된 수치모델(Numerical Model)은 수치 계산 오차(Numerical Error)가 발생하게 되며, 또한 다량의 오염물질이 유입되고 변화 기작이 복잡할 경우 컴퓨터의 많은 기억용량을 필요하게 되어 PC에 프로그램을 실행하는데 문제가 생기게 된다. QUAL2E의 경우 이와같은 현상이 Park and Uchirin(1990)에 의해 보고되었다.

이러한 단점을 보완하기 위하여 STREAM과 STRESS모델은 하천을 여러개의 반응조가 나열된 것으로 가정한 CIS(Cell-In-Series)방법에 기초하였다. (그림 2.1). CIS방법은 Banks(1974)와 Stefan and Demetropoulos(1981) 등에 의해 시작되었으며 모델방법과 계산이 간단하면서도 플럭 흐름계와 동일한 모델결과를 갖는다는 것이 알려졌다(Uchirin and Ollinger, 1984). 특히 우리나라, 일본, 영국, 등의 하천은 비교적 경사가 크고 유속이 빠르기 때문에 CIS방법이 적절하다. 그러나 미국의 일부 평원에서 나타나는 수심이 깊고 유속이 매우 느린 하천이나, 조석현상이 나타나는 하천(Tidal River)과 하구(Estuary)는 하천거리에 따른 확산(Longitudinal Dispersion)현상이 수질변화에 큰 영

향을 미치기 때문에 STREAM과 STRESS모델의 적용은 적절하지 못하다.

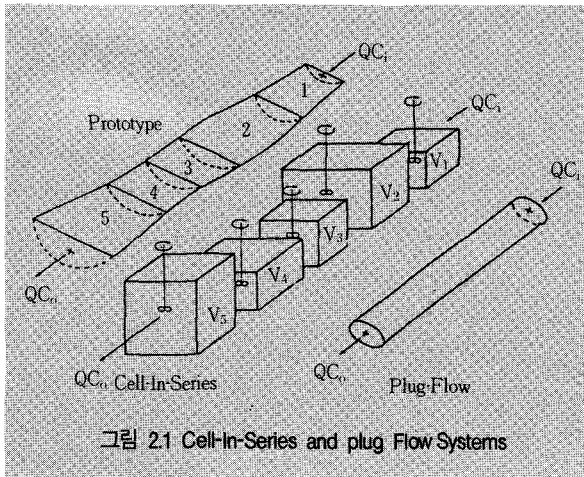


그림 21 Cell-In-Series and plug Flow Systems

2.2 STREAM모델식

그림 2.1에서와 같이 V_i 번째의 반응조에서는 V_{i-1} 번째 반응조의 농도 C_{i-1} 가 유입되어 Δt 만큼 체류하는 동안 농도 C_i 로 변화하여 V_{i+1} 번째 반응조로 이동한다. 이러한 계를 가정하고 하나의 반응조에서 물질수지원리를 적용하여 하천에서 예측하고자 하는 각 인자들의 변화를 시뮬레이션할 수 있다. CIS에서 i 번째 반응조의 물질수지원리를 적용하면 다음 식(1)과 같다.

$$QC_i - QC_{i-1} \pm \Sigma K_j C_i V_i \pm \Sigma S_j V_i = 0 \dots\dots\dots (1)$$

여기서, Q : 유량 [$L^3 \cdot T^{-1}$],

C_{i-1} : $i-1$ 번째 반응조에서의 농도 [$M \cdot L^{-3}$],

C_i : i 번째 반응조에서의 농도 [$M \cdot L^{-3}$],

ΣK_j : 반응조 내에서의 C_i 와 1차반응 형태로 사멸 및 생성계수의 합 [T^{-1}],

ΣS_j : 반응조 내에서의 C_i 와 무관하게 반응하는 사멸 및 생성되는 농도변화의 총합 ($M \cdot L^3 \cdot T^{-1}$), 그리고

V_i : 반응조 i 의 부피(L^3)이다.

이식을 C_i 에 대하여 정리하고 $V/Q = \Delta t$ 로 대체하면 다음 식(2)와 같다.

$$C_i = \frac{C_{i-1} \pm \Sigma S_j \Delta t}{1 \pm \Sigma K_j \Delta t} \dots\dots\dots (2)$$

또한 CIS에서의 좌표축은 플럭흐름계에서와 같이 고정된 Eulerian좌표가 아닌 시간에 따라 이동하는 Lagrangian좌표가 된다. 그림 2.2에서와 같이 lagrangian좌표에서는 하천 수체의 조각이 하류로 흘러가는 동안 사람이 수체의 흐름과 동일한 속도로 이동하면서 주어진 수체조각에서 수질변화를 관찰하는 것과 같다. 개발된 모델은 이러한 모델 구조와 모델결과를 그래픽으로 제시하는 특징에 따라 STREAM(Segment Travel River Ecosystem Autograph Model)으로 명명되었다. 박 등(1991)에서 동일한 하천 조건하에서 STREAM모델과 미국 연방 환경청가 개발한 QUAL2E 모델을 실행하여 STREAM모델의 타당성을 검토하였다.

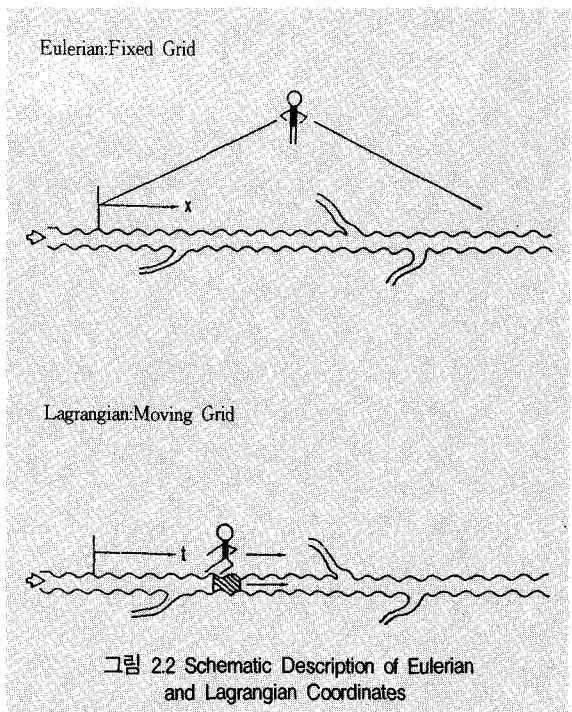


그림 22 Schematic Description of Eulerian and Lagrangian Coordinates

2.3 STRESS모델식

하천 상류에서 일정한 농도를 가진 수체가 하류까지 이동할 때 이론적으로 농도변화 정도가 일정해야 하지만 자연에서 일어나는 무작위 현상으로 인하여 오염물질의 변화가 불규칙하다. 이러한 불규칙적인 변화율을 정량적으로 예측하기 위해 무작위 현상이 예상되

는 변수를 모델에 지적하는 것이 필요하다.

하천 상류에서 일정한 농도의 수체가 하류로 흘러가는 동안 미연방환경처의 UNCAS(QUAL2E-UNCAS)모델의 경우 하천에서 나타나는 무작위 현상은 반응계수에 있다고 가정하고 확률모델 입력자료에 각 수질반응계수의 변화폭이 주어진다. 모든 호에 있으나 본 연구에서는 대부분의 물리, 화학, 생물학적 반응들이 반응시간에 의해 결정되는 것과 같이 수중에 존재하는 수질인자들의 변화량을 결정하는 주된 요인이 반응시간, 즉 체류시간에 있다고 가정하였다. 그림 2.3에서 보는 바와 같이 실제 하천에서 흘러가는 물은 바람과 바닥의 마찰저항(a), 하천의 굴곡(b), 방해물(c), 정체수역(d), 보(e) 등으로 인한 영향에 의해 이동경로와 속도가 다르게 된다. 이러한 수체를 작은 수체 덩어리의 모임이라고 가정하면 동일한 지점에서 출발한 수체 덩어리는 일정한 시간 동안에 이동한 거리가 다르다. 이는 수체에 존재하는 수질인자들이 각각 서로 다른 반응시간에서 변화되는 것을 의미하며 유입수의 경우도 동일한 임의현상 과정을 거쳐 유입지점에서 유입되기 때문에 유입수량 및 농도의 임의현상에 따른 변화에도 적용되어질 수 있다.

가정된 임의현상을 컴퓨터로 묘사하기 위해서는 임의현상에 적절한 난수를 부여하여야 한다. 일반적으로 좋은 난수라는 것은 일양분포(Uniform Distribution)를 얼마나 잘 표현하고 있는가에 의해 결정된다. 본 모델은 컴퓨터에서 직접 난수(Random Number)를 얻는 가장 일반적인 방법을 이용하였다. 컴퓨터로부터 얻은 난수들은 일양분포를 하고 있으며 가정된 임의현상은 정규분포(Normal Distribution)를 따르고 있다. 따라서 컴퓨터에서 얻은 일양분포의 난수값을 임의현상에 따른 정규분포 난수로 변환하는 난수 변환 과정이 필요하다.

STRESS모델은 일양분포 난수를 정규분포 난수로 변환하기 위해 다음 식(3)을 이용하였다. 이 식은 많은 정규 편차 변환 방법 중 경험적인 자료를 기초로 단순화한 것으로 대부분의 표준 정규 편차 범위에서 정확성이 있다(박, 1990).

따라서 식(3)에 임의현상들의 분산값(Variance: σ), 평균값(Mean: M)을 적용하면 식(4)와 같이 표현할 수 있다.

$$R_n = \lambda \cdot \ln \left[\frac{R_u}{1 - R_u} \right] \dots\dots\dots (3)$$

$$X = R_n \cdot \sigma + M_i \dots\dots\dots (4)$$

여기서, X: 임의값,
 R_n : 정규 분포된 난수,
 λ : 정규화 계수,
 R_u : 0에서 1사이의 균일한 난수,
 σ_i : X의 표준편차, 그리고
 M_i : X의 평균이다.

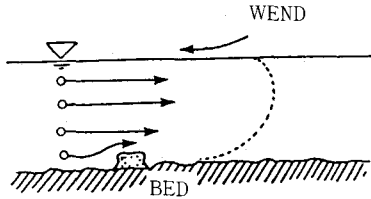
하천에서 일어나는 무작위 체류시간을 반응조 나열법 기본식에 적용되면 n번째 시뮬레이션되는 각 반응조에서 변화하는 수질은 다음 식(5)와 같이 표현되어진다.

$$C_{i,n} = \frac{C_{i-1,n} \pm \sum S_i (R_n \cdot \sigma + M)}{1 \pm \sum K_i (R_n \cdot \sigma + M)} \dots\dots\dots (5)$$

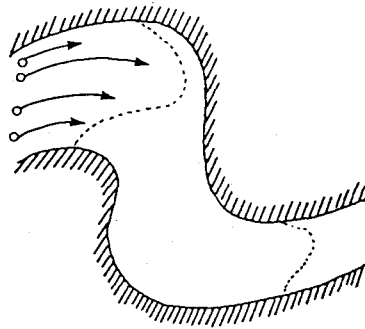
여기서, $C_{i,n}$: n번째 시뮬레이션되는 i번째 반응조에서의 농도 [$M \cdot L^{-3}$],
 $C_{i-1,n}$: n번째 시뮬레이션되는 i-1번째 반응조에서의 농도 [$M \cdot L^{-3}$],
 $\sum K_i$: 반응조 내에서의 C_i 와 1차반응으로 사멸 및 생성계수의 합 [T^{-1}],
 $\sum S_i$: 반응조 내에서의 C_i 와 무관하게 반응하는 사멸 및 생성되는 농도변화의 총합 [$M \cdot L^{-3} \cdot T^{-1}$],
 R_n : n번째 시뮬레이션에서 발생된 정규분포 난수값 [Dimensionless],
 σ : 체류시간(Δt)의 표준편차[T], 그리고
 M : 체류시간(Δt)의 평균값[T]이다.

STRESS모델은 식(4)를 기본 방정식으로 하고 발생되는 난수에 따라 시뮬레이션을 반복수행하고 수행횟수 만큼의 결과를 산출한다. 산출된 결과를 지정된 하천 지점에서 수질항목별로 기록하고 시뮬레이션이 끝난 후, 평균, 표준편차, 신뢰구간, 빈도분포 등을 산출한다. 모델 구조와 확률분석의 특징에 따라 STR-ESS(Segment Travel River Ecosystem Stochastic Simulation)로 명명하였다. 박과 이(1993)에서 실제 하천에 적용하여 모델에 내재된 확률 분석 능력을 검토하였다.

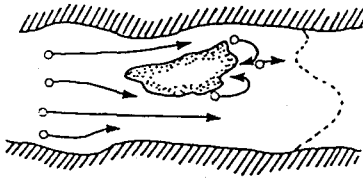
a) Wind and Bed Shear Stresses Effect



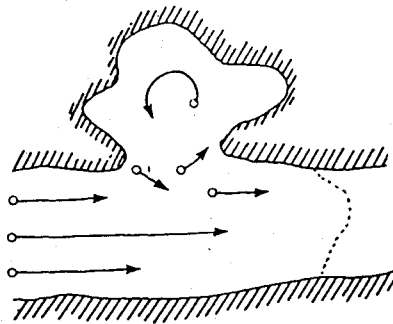
b) Meandering Effect



c) Instream 'Object Effect'



d) Dead Zone Back Mixing Effect'



e) Impoundment Effect

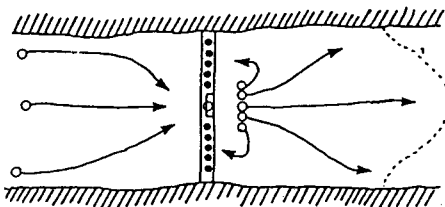


그림 23 Schematics of Random Transport Phenomena in Natural Stream

오염은 순간이고 정화는 자자손손