

〈논 단〉

## 하천의 수질관리

한 건 연\*

### 1. 머릿말

인구의 증가와 도시집중, 산업의 발전은 필연적으로 용수수요의 격증을 초래하게 되었으며 이와 수반된 하천수의 수질문제는 중요한 사회 문제로 대두되고 있다. 최근에 들어 국내 4대 하천의 수질은 폐수 및 분뇨처리장의 증설, 하수관거의 확충등에도 불구하고 오염 배출원 주위의 국부적인 오염뿐만 아니라 수계 전반에 걸쳐 상수원으로 취수할수 있는 지점이 급격히 감소되는등 수질오염 양상이 심각한 실정이다. 국내 주요 하천에서의 주요지점에 대한 수질조사 및 분석은 관련기관에서 계속 수행되고 있으나 이를 효과적으로 활용한 종합적인 수질관리 대책은 아직도 미흡한 점이 많다고 사료된다.

수자원의 효율적인 수질 관리를 위하여서는 1)오염원을 조사하여 오염부하량을 분석하여야 하고 2)하도 구간에서의 수리, 수문 특성을 조사 분석하여 하도내에서 흐름해석을 실시하여야 하며 3)오염물 배출이 하천 수질에 미치는 영향을 확정론적 방법으로 해석하고 이를 실측치와 비교 검토하고 4) 대상 하천구간에서 수자원 용도에 따른 적절한 수질목표 기준을 수립하고 5) 목표하는 수질 기준을 달성하기 위하여 주요 오염원 및 지류로부터의 오염농도를 효과적으로 규제하기 위한 최적의 수질관리 방안을 추계학적 방법에 의하여 수립하여야 할 것이다.

### 2. 확정론적 방법에 의한 하천 수질관리

하천에서의 수질관리를 위한 확정론적 방법은 비교적 단순한 해석적 모형으로 부터 매우 정교한 부정류

모형에 이르기까지 광범위하다. 하천에서 주된 수질변화 양상은 흐름방향에 대하여 발생하기 때문에 일반적으로 단면평균치를 고려한 1차원 종단모형이 적절하다. 이러한 1차원적 가정은 대부분의 하천수계에 대하여 유효하나 폐수방류구 및 오염 하천의 합류부와 같은 국부적인 영역에서는 불충분한 것으로서 이 경우에는 2차원의 해석적 모형이 방류구 부근에서의 확산과 희석 현상을 규명하기 위하여 적용될수 있다.

이러한 혼합모형은 오염물이 배출기준에 적합하도록 충분히 희석될수 있는지의 문제를 해결하기 위하여 사용되기도 한다. 최근에 미국 EPA에서는 각종 모형들을 손쉽게 사용할수 있도록 그 사용지침들을 expert system화 하고 있다. 앞으로 이러한 expert system은 사용자로 하여금 모형의 적절한 선정과 그 적용이 가능하도록 이끌어 줄수 있을 것이다.

하천 수질모형(water quality model)은 오염부하, 운송 및 반응에 기인한 수질해석 인자의 변화를 예측하고자 하는 것이며 혼합모형(mixing model)은 초기의 혼합과정, 확산, 희석등을 예측하며 때로는 오염물의 하류방향으로의 이동을 처리할 수는 있으나 수질인자의 상호작용과 반응은 고려하지 않고 있다. 혼합모형에서는 오염물을 보존적인 것으로 취급하므로 광역의 하천 수질 연구에는 적합하지 못하다.

1차원 하천수질 모형으로서는 정상상태의 해석적인 해로부터 동역학적 수치모형에 이르기까지 다양하다. 정상상태의 해석적인 해는 손쉽게 적용이 가능하고 최소한의 자료만이 요구된다는 면에서 장점을 가질수 있으나 하천지형의 많은 단순화 과정을 요구하며, 시간 변동성을 갖는 계산 결과를 제공하지 못하는 것이 단점이다. 정상상태의 해석적인 모형의 전산화는 하천수

\* 정희원, 경북대학교 공과대학 토목공학과 부교수

계와 같은 복잡한 시스템을 손쉽게 처리 할수 있도록 하였다. 美지질조사국의 Streeter-Phelps 모형과 美공병단의 STEADY 모형은 하천수계에 대한 정상상태의 해를 계산하는 해석적인 모형이다.

해석적인 해를 용이하게 하였던 가정들이 부적절하게 되거나, 확장된 식의 복잡성으로 인하여 해석적 해가 존재하지 않는 경우에는 수치적인 수질모형에 의존하는 것이 필요하게 된다. 수치적인 수질모형은 허용될수 있는 많은 사항을 처리하기 위하여 광범위한 변동성을 가질수 있다. 고려될 내용들에는 수질인자의 수와 유형, 시간변동 조건을 허용하는지의 여부등을 포함할수 있겠다.

동역학적 모형과 정상상태의 모형의 중간적인 모델링 기법의 예로서는 QUAL2E모형을 들수 있는데 수치해석적 1차원 종단형의 수질모형으로서 수리학적 정상상태의 흐름을 가정하고 있으나 수질인자는 정상상태 또는 일중변화와 같은 동역학적상태의 해석이 가능하다. 이 모형은 하천수계에 대한 표준적인, 특히 오염부하의 배분연구등에 활용되고 있으며 전세계적으로 보급되어 다양하게 변형된 모형들이 사용되고 있다.

동역학적 모형은 각종 변수의 시간의존성이 뚜렷하고 대상구간에 대한 유하시간보다 훨씬 짧은 기간동안에 큰 흐름특성의 변화가 발생하는 경우에 필요한 모형으로서 하도구간을 따라 시간변동성을 갖는 흐름과 수질의 영향이 고려된다. 동역학적 하천 수질 모형은 시간적으로 변화하는 구성수질 인자의 운송과 변형을 처리할수 있는 부정류 상태의 수리-수문모형이라 할수 있겠다. 다양한 형태의 동역학적인 모형이 개발되어 있으나 특히 美 육군공병단의 CE-QUAL-RIV1 모형이 대표적인 것이다.

이 모형은 수리해석을 위한 부분과 수질해석을 위한 부분으로 구성되어 있는데 수리해석은 부정류해석을 기초로 하고 있으며 댐 이나 웨어와 같은 수개의 수공 구조물과 하천의 하도망 시스템을 동역학적으로 해석할수 있다. 수질해석은 수리해석 결과나 실측치등을 이용하게 되는데 수질인자의 질량보존 방정식을 풀기 위하여 유한차분방법을 이용하며, 이 경우에 최소한의 수치확산을 가지고 급경사의 수질구배의 운송을 정확하게 해석할수 있는 해석기법을 사용할수 있다.

일반적으로 배출원 부근에서는 수체에서 보다도 높

은 농도경사를 갖게 되는데 배출수 방류구 부근에서의 흐름특성과 농도경사를 결정하기 위하여 혼합모형 사용하게 된다. 점오염원에 의한 오염도 해석을 위한 혼합영역(mixing zone) 해석은 두가지 목적을 가지고 있다.

첫째로, 오염원 방류구 주변에서의 배출오염물의 충분한 희석을 보여줌으로서 배출구 수질기준과 같은 규정된 농도가 방류구의 규정된 거리 이내에서는 초과되지 않도록 하는 것과 둘째로, 배출오염물이 하천횡단면이나 성층화된 저수지에서의 임의층에 대하여 거의 균일하게 혼합되기 위하여 필요한 거리를 결정하기 위한 것이다.

혼합영역 해석으로부터 하천과 방류점 주변에서의 지형, 하천유량, 방류구의 배출조건의 함수로 농도의 등치선을 결정할수 있다. 모형의 개발을 위해서는 현 지상황의 동수역학적 해석을 반드시 필요로 하게 된다. 예를 들면, 측류수로 유량과 하천유량은 그 두가지가 완전 혼합되기 전까지 다음과 같은 여러가지 과정을 통하여 서로 영향을 끼친다.

즉, 유량의 운동량에 기인한 jet효과, 배출구 유입에 의한 하천흐름의 변화, 하천흐름에 의한 하류방향으로의 이송효과, 하천에서의 2차류를 포함한 횡방향 난류 혼합, 배출수와 하천수와의 밀도차이에 기인한 부력에 의한 확산효과, 하상 전단응력에 기인한 하천에서의 연직방향 난류혼합, 주운, 수공구조물, 및 인공적 요인에 의한 혼합등이 고려되어야할 과정이다.

방류구 모형은 크게 近域(near-field) 해석과 遠域(far-field) 해석모형으로 구분할수 있다. 近域 해석모형에 있어서는 혼합과 희석과정은 배출구 조건에 의하여 동수역학적으로 영향을 받게 된다. 遠域해석 모형은 통상 2차원적으로 해석되며 수평 또는 연직방향으로 이송-확산방정식을 사용한다. 만일 배출수와 하천수간에 밀도 차이가 발생된다면, 하천수가 유속이 매우 느린상태이거나 저수일 경우에는 성층화된 밀도류가 발생하게 되기도 한다. 배출수가 판로를 통하여 방류된다면, 近域해석은 jet흐름모형의 적용을 필요로 하게 되며 복잡한 지형조건일 경우에는 물리적인 모형을 필요로 하게 된다.

3. 추계학적 방법에 의한 하천 수질관리

하천에서의 수질관리를 위한 이제까지의 대부분의 연구는 모형에 사용된 각종 매개변수들의 변동성이 고려되지 않은 상태로 모형 계산치에 포함되어 있는 오차의 어떠한 정량적인 추정도 실시하지 않은 상태인 확정론적인 값으로서 수질관리대책을 수립하도록 구성되어 있다. 이러한 유형의 해석은 많은 경우에 있어서 그릇된 수질관리대책을 제시할수 있다.

예를 들어, 재포기계수에 있어서의 약간의 변화가 용존산소의 예측에 있어서의 오차를 유발 할수 있고, 이것이 결국에는 수질경감계획의 수립시 투자비용 및 우선순위에 있어 커다란 차이를 야기할수 있게 된다. 이것은 모형에서 사용되는 매개변수의 평균값 뿐만아니라 관련 매개변수의 변동성을 고려하는것이 중요하다는 것을 보여준다.

일반적으로 확정론적 방법에 의한 수질해석은 실제 현상에 대한 근사적인 표현으로서 많은 불확실한 요소를 내포하고 있다. 이 경우 모형에 의한 계산결과와 실제 관측치간에 완전한 일치도를 도출한다는 것은 거의 불가능하다. 이러한 불일치는 하천의 수온변화나 그 불균일분포등과 같은 실제 자연현상내에 포함되어 있는 대상인자의 변동성, 모형을 구성하는 관련변수(반응상수, 초기 및 경계조건, 오염부하량등)의 불확실성, 모형구성 과정에 포함되지 못한 가정이나 정보의 결여 등에 기인되고 있다.

따라서, 확정론적 방법은 언제나 오차와 불확실성을 내포하게 되어 실제 자연현상에서의 모든 상황을 완벽하게 재현하기는 어렵다. 자연 현상자체에 내포되어 있는 본질적인 임의성이나 그 자연 현상을 수학적인 모형으로 간략화시키는 과정에서 복잡성이나 경제성등의 이유등으로 계산되지 못한 부분들이 있게 된다. 즉 모형개발 중 어떤 구성 성분을 무시하거나 부적절한 가정을 취함으로써 주어진 시스템을 기술하는데 부정확한 모형을 사용함으로써 얻어지는 성분, 모형에 쓰여지는 각종 계수나 부하량, 초기조건등과 같이 모형에서의 불확실한 매개변수에서 기인되는 성분등이 그 예다.

모형계수의 불확실성은 실제 시스템의 환경조건등의 자연적인 변동성으로 기인될 수도 있다. 그러므로 각 변수의 실제값은 주로 일정한 범위안에서 변화하게 된다. 이들 계수들의 불확실성은 모형의 계산에 따라 전

파되고 전체모형의 불확실성에도 기여한다. 그러므로 확정론적 방법에서와 같이 모든 계수들에 대하여 하나의 확정론적 값을 사용하는 것 대신에 이들 계수들의 변동성이나 불확실성을 고려해주는 과정이 반드시 필요하게 된다.

따라서, 불확실한 계수들을 고려한 Streeter-Phelps의 다양한 확장식으로 기술된 여러유형의 용존산소 모형을 기초로 하고 실측치와의 비교검토를 통하여 최적의 복잡성을 지닌 모형의 도출도 필요하게 된다. 유도된 최적모형에 사용되는 여러 변수들은 확정론적인 값이 아닌 임의의 확률분포로 표현되는 모의발생 변수로 고려 되어 해석하게 된다.

불확실성 해석기법으로는 예민도 분석, 1차오차해석, Monte-Carlo 해석등이 있다. 예민도분석 기법은 한번에 한개의 입력변수 이상에 대하여 예민도를 처리할수 있다는 것은 출력변수에 대한 그것들의 상호작용을 검토할수 있다는 면에서 효과적인 방법이다. 그러나, 많은 입력 매개변수가 변동성을 갖는 경우에는 조합의 수가 과다하게 되어 결과를 분석하는 것이 복잡하게 되는 단점이 있다. 예민도 분석을 위해서는 예민도 분석을 실시할 입력변수를 선정하고, 그 변동성 정도의 크기를 규정하여야 한다.

1차 오차해석은 다변수를 처리하는 과정에서 분산을 계산하는데 있어 1차 근사해를 이용하는 것이다. 이 경우 입력변수는 공분산을 무시하여 독립적으로 작용하는 것으로 가정하였고, 모형은 선형으로 고려하여 해석하게 된다. Monte-Carlo 해석기법은 임의의 성분을 가지는 복잡한 시스템을 수치적으로 처리해석 하는 방법이다. 입력변수는 미리 결정된 확률분포형으로 부터 임의로 추출되며 반복된 시뮬레이션과정으로 계산된 출력분포는 통계적으로 해석된다. 이 방법의 효율성은 수질모형의 비선형성에 의하여 영향받지 않고 그 결과로 제시되는 출력빈도 분포가 큰 장점이기는 하나, 많은 계산 시간을 필요로 한다.

1차 오차분석은 모형의 예민도를 직접적으로 평가할 수는 있으나 변화성이 모형구조상의 동역학적 특성보다도 모형 구성성분의 변화성에 더욱 의존하게 된다. Monte-Carlo 해석 기법은 최근 고속전자 계산기의 발전과 더불어 이들 불확실성 해석 기법 중 계산 결과의 신뢰성과 오차해석 이론 등에 있어 가장 합리적인

기법으로 판단되어 널리 적용되고 있는 기법이다. 하천에서의 용존산소 모형에 관한 추계학적 관련식을 각 매개변수에 대한 변화성을 고려하여 해석하여야 할 것이다. 이러한 매개변수들은 일정한 상수 대신에 확률분포로 표시되는 random variable 로 고려한 해석방법이 사용되었다.

이 해석방법은 어떤 문제에 포함되어 있는 영향인자가 많기 때문에 해석적인 해가 존재하지 않는 경우와 같은 복잡한 문제를 풀기 위하여 사용 될 수 있는 임의의 표본 추출의 계산기법이다. 해석에 있어서 모형의 반응계수, 오염부하, 초기조건 등과 같은 변동계수의 random value 는 각 매개변수의 변화성을 표현한 독립적인 확률분포를 이용하여 구성된다.

이러한 매개변수들에 대한 실제적인 확률분포의 선택은 이러한 매개변수들에 대하여 얻을수 있는 각종 문헌과 실측자료에 의하여 결정될수 있다. 매개변수의 평균치는 직접 개개별로 측정하거나 또는 실험실 및 야외에서 실험적인 연구를 통하여 산정하여야 하고, 그 표준 편차는 매개변수의 평균치의 percentage로 주어 질수 있고 또한 문헌에 기록된 값을 참고적으로 인용할 수도 있겠다. 관련 매개변수에 관한 변동성이 고려되고 있는 경우에는 추계학적 해석을 위한 많은 적용에 있어 상이한 매개변수의 변동성에 관한 관련문헌으로부터의 정보는 매우 유용한 자료가 된다.

이렇게 하여 각기 임의로 발생된 매개변수치는 추계학적 모형내에 치환되어 수백여번의 선택과정을 반복 수행하면, 이러한 불확실한 조건들 하에서 하천에서 실제로 발생할수 있는 가능한 용존산소의 농도분포를 계산하게 된다. 이 해석을 위하여 필요한 입력자료는 입력자료에 대한 확률밀도함수의 선정, 입력자료의 분산, 수행된 시뮬레이션의 수 등이다.

#### 4. 맺음말

환경보전법에 의하면 환경오염이 현저하거나 현저할 우려가 있는 지역을 특별대책 지역으로 지정하고 환경보전을 위한 특별종합대책을 수립하도록 규정하고 있다. 즉 주요 오염하천에서의 수질 오염현황과 장래의 추세를 판단하여 수질오염 문제 지역 및 문제가 예상되는 지역에 대한 정성, 정량적인 판별을 확정론적 및 추계학적 수질해석 모형을 통하여 규명하여야 할 것이다. 하도내의 수질 악화 예상구간에서 목표 수질에 도달하기 위한 해석방법이 수립됨으로서, 보다 체계적이고 과학적인 최적의 수질 관리기법이 제시되어 국가적인 수자원 수질관리 대책에 기여할수 있을 것이다.

하천 수질해석에 있어서는 확정론적 성분외에도 추계학적 수질변동 특성을 파악하는 것이 보다 과학적인 수질관리 대책 수립을 위하여 중요한 과정이다. 즉, 하천수질의 불확실성 해석을 위하여 모형의 각종 매개변수의 변동특성을 고려한 추계학적 해석을 실시하여 임의의 하천지점에서 수질변동 특성을 확률적으로 계산하고 여러가지 수질관리 대안에 대한 수질개선 효과를 효율적으로 검토할 수 있을 것이다.

우리나라와 같이 폐수처리장에서의 방류량과 오염부하량, 각종 반응계수, 하천유량 및 유속의 변동성이 매우 심한 하천수계에서의 효과적인 수질관리를 위해서는 추계학적 모형에 의한 관리기법이 적용성이 큰 것으로 사료된다.