호수의 수질 모델링

서 동 일 (충남대학교 환경공학과 조교수)

1. 서론

우리 나라에서는 각종 용수의 취수원으로서 지표수의 사용이(93%) 월등하게 많은 편이다(한국수자원공사, 1997). 지표수는 하천수(56%)를 이용하는 경우가 호소수(37%)를 이용하는 경우보다 많은 편이나, 대부분의 대형 취수원은 소양호, 충주호, 대청호 등의 인공저수지에 위치해 있으며 호소수의 사용량은 계속적으로 증가하는 추세에 있다. 그러나 저수지의 수질은 유역에서 유입되는 오염물질이 지속적으로 증가하고 또한 많은 부분이 호내에 축적되면서 수질관리에 큰 어려움을 겪고 있다. 호수의 수질문제를 해결하기 위하여 가장 중요한 것은 유입되는 오염물질을 효과적으로 차단하는 것이다. 그러나 현실적으로는 오염원을 완벽한 차단을 기대할 수는 없으며 따라서 오염물질이 호내로 시간적 또는 공간적으로 어떻게 유입되고 또 호내에서 이동하는가를 파악하고 그에 따른 대응책을 마련하는 것이 실제로는 더욱 필요하다.

호수의 수질모델링 기법은 이러한 목적을 위하여 사용될 수 있는 가장 효과적인 방법이다. 그러나 수질모델에 필요한 입력자료를 구성하고 결과를 합리적으로 적용하기 위해서는 수질모델 뿐만 아니라 호소 현장에 대한 올바른 이해를 기반으로 하는 것이 매우 중요하다. 본 고에서는 호소의 합리적인 수질관리 방안을 수립하기 위하여 수질 모델을 사용하는 데 있어서 반드시 고려해야 하는 사항들을 정리하고자 한다.

2. 호소의 특성

2.1 호수내의 물질순환

호소, 저수지, 하천, 늪지 등을 포함한 내륙의 수계는 주변의 기후, 지형 등과 물리적, 화학적 또는 생물학적으로 복잡하게 관련되어 있다. 호수나 저수지 등과 같이 비교적 정체된 물의 혼합현상은 태양에너지의 변화에 따른 가열과 냉각, 수온에 따른 밀도의 변화 그리고 바람의 세기등에 의하여 영향을 받는다. 호수의 식물성 플랑크톤은 무기물을 영양원으로 사용하여 광합성 작용을 통해 유기물을 합성한다. 이 유기물은 먹이 사슬을 따라 고등동물에게 전달되고, 배설 또는 사멸에 의해 동물의 체내로부터 분리된 유기물은 박테리아에 의해 분해되어 다시 무기물로 변화된다.

자연에는 평형을 유지하려는 작용이 있으며 호수에서도 외부로부터 이물질이 유입되면, 이를 분해하거나 방출시켜 일정한 상태를 유지하려는 경향이 있다. 이러한 자연의 작용을 자정능력이라고 하는데, 일정한 상태가 유지되는 호수 및 하천에는 각각의 환경에 따라 독특한 생태계가 형성되고 물질의 순환이 반복 된다. 그러나 자연의 자정능력에는 한계가 있으며 이를 초월하는 오염현상은 생태계를 포함한 기존의 물질순환 계통을 파괴하게 된다. 자정능력에는 여러 가지 현상이 있으며, 확산과 분해 그리고 침전 등은 그 대표적인 예이다.

2.2 부영양화 현상

부영양화 현상이란 수중에 미생물들이 섭취할 수 있는 먹이가 다량 존재하는 상태를 말한다. 부영양화를 유발하는 주요 영양소는 질소, 인 등이며 조류는 수온, 빛, 영양분 등이 적절하면 며칠 안에 호수 전체

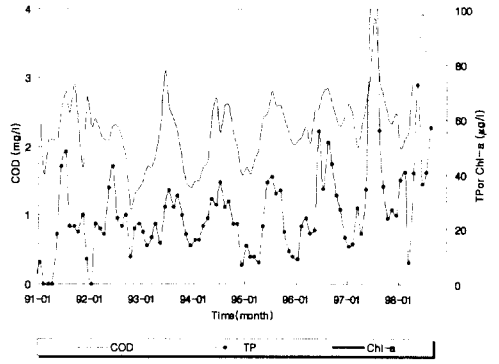

그림 1. 대청호의 엽록소, 총인, COD 농도의 변화 특성

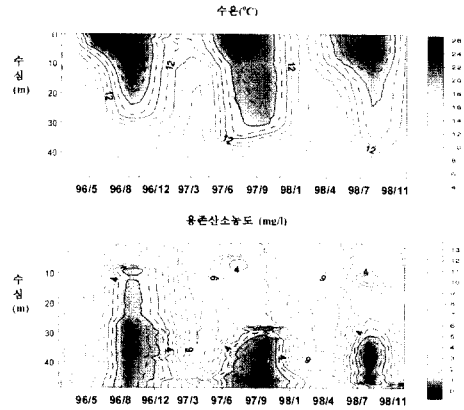

그림 2. 대청호의 수심별 온도 및 용존산소의 동적 변화특성

를 뒤덮을 만큼 빨리 성장한다. 호수의 수질이 악화되면서 규조류에서 녹조류 또는 남조류 등으로 조류의 우점종이 바뀐다. 특히 남조류는 식물성 플랑크톤의 중에서 가장 하등한 종류로서 악화된 수질에 잘 적응하면서 경우에 따라서는 비정상적으로 성장하여 수질에 심각한 영향을 미치기도 한다. 그림 1은 대청호의 엽록소 농도와 총인농도, 총질소농도 그리고 COD 농도를 함께 나타낸 것이다. 식물성플랑크톤의 지표로 사용되는 엽록소 농도는 총인농도와 COD 농도와는 밀접한 관계가 있는 것으로 관찰된다. 이는 하절기 녹조현상의 원인과 결과를 규명하는데 이들 수질 변수들이 매우 중요하다는 것을 시사한다.

2.3 성층현상

물은 온도에 따라 독특한 성질을 나타낸다. 수표면에 도달한 태양에너지는 물에 의해 흡수되어 수심에 따라 지수함수적으로 감소한다. 태양광선의 대부분은 파장이 750nm보다 긴 적외선 스펙트럼의 범위에 속하므로 호수 표층 2m 내에서 수표면에 도달하는 양의 50% 가량이 흡수된다(Wetzel, 1983). 물은 비열이 다른 물질에 비하여 높고, 열전도율이 낮기 때문에 많은 에너지가 열 에너지로 변환되어 호수에 축적된다. 호수 내부의 열 에너지는 바람의 역할, 물의 거동, 호수의 지형, 유출입량 등에 의해 영향을 받는다. 호수 표면의 온도가 상승하면 밀도가 감소하여 아래층의 물과 밀도차가 생기지만 위와 아래층의 혼합이 잘 이루어 지지 않게 된다. 결국 물은 따뜻하고 혼합이 잘 이루어지는 표수층과 상대적으로 수온이 낮고 혼합이 잘 이루어지지 않는 심수층으로 분리된다. 이 두 층 사이에서 온도와 밀도가 급격히 변하는 구역을 중간층 이라고 부른다. 이러한 현상을 성층화현상(成層化:stratification) 이라고 하며, 이는 호수 내부의 화학적 순환과 생물계에 중대한 영향을 미친다.

그림 2에 나타난 바와 같이 대청호에서 동절기에는 상하층의 수온이 모두 4℃ 가량을 보이며 상하층의 용존산소 농도 또한 포화상태에 가까운 것으로 나타나고 있다. 그러나 하절기에는 표수층의 수온이 30℃를 상회하고 아래층은 8℃가량을 보이면서 상하층의 수온은 현격한 차이를 나타내고 있다. 성층현상이 발생하는 경우 하층의 용존 산소는 점차 감소하여 무산소 조건을 나타내며 이는 산소를 필요로 하는 각종 생물들에게 치명적인 조건을 제공할 뿐만 아니라 호수의 물질순환 전반에 심각한 영향을 끼친다. 한편, 대청호에서는 홍수기에 유역에서 유입된 부유물질들은 소위 밀도류를 형성하여 호수바닥 또는 밀도의 평형을 유지하는 일정 깊이를 따라 댐방류구 방향으로 이동한다. 하절기에 호수의 입구에 도달한 밀도류는 약 3-4 개월 후에 댐의 방류구에 도달하며, 댐 하류의 신탄진 취수장의 수질에 심각한 영향을 미친다. 그러나 이러한 호수수질에 관한 제반 현상을 제대로 이해하지 못할 경우 적절한 수질관리 대책을 수립하기가 매우 어려울 수 밖에 없다.

3. 호수의 수질모델링

호수 또는 하천 등에 적용할 수 있는 수질관리 기법은 매우 다양하나, 이들이 적용되어야 하는 시간적, 공간적 위치를 결정하는데 모델링 기법이 활용되어야 한다. 모델은 실제로 시행오차를 통하여 문제의 해결방안을 찾는 것보다, 빠르고 경제적으로 각종 대안을 평가할 수 있다. 호수의 수질을 모델링의 목적을 성취하기 위해서는 수질모형이 요구하는 자료를 확보할 수 있는지의 여부가 매우 중요하다. 사실상 수질 모형은 입력자료를 제공하여 주면 결과를 계산해 주는 하나의 프로그램에 불과하다. 수질모델의 진정한 효용성은 정확한 입력자료를 구성하고 또한 예측결과를 합리적으로 해석할 수 있는 수질모델의 사용자의 능력에 따라서 매우 크게 좌우된다. 호수의 수질모델링에서 기본적으로 고려되는 사항은 그림 3에 나타난 바와 같으며 입력자료를 구성하는 데 있어서 각별히 유의해야 할 사항들은 다음과 같다

(1) 흐름 및 확산에 관한 자료

물질의 이동에 가장 큰 영향을 미치는 것은 수체가 물리적으로 이동하는 현상이다. 하천의 경우 1차원적으로 흐름을 예측할 수 있는 수리모형이 다수 개발되어 있으며 수질 모형에 비교적 용이하게 사용되는 경향이다. 그러나 호소의 경우, 흐름이 매우 완만하고 지형 또는 밀도 등의 차이에 의하여 2차원 또는 3차원의 유동모형이 필요한 경우가 많다. 그러나 유동모형은 고려하는 차원이 높아질수록 복잡해질 수밖에 없으며 계산에 필요한 노력과 시간이 증가할 뿐만 아니라 이러한 모델에 수질관련 반응식을 첨가할 경우 문제는 더욱 어려워 진다. 현재 3차원의 유동모형에 수질 반응식을 결합하는 작업이 활발하게 진행되고 있기는 하나, 근본적으로 유동 모형은 이론식을 기반으로 하고 수질반응식은 경험적인 요소가 대부분이므로 두 가지의 요소가 함께 고려되는 결과의 해석은 상당한 주의를 요한다.

호수의 성층특성은 연중 계속적으로 변화하기 때문에 표층수 및 저층수의 깊이가 또한 계속 변화하며 경우에 따라서는 수직방향으로 여러 단계의 층이 존재하기도 한다. 그러나 소구간의 크기는 유입량에 따라서 결정될 뿐, 성층현상과 연결해서 시기에 따라 조정하기가 거의 불가능하다. 이러한 문제를 극복하기 위해서는 상하층간의 확산계수를 조절하는 방법을 사용할 수 있으나, 이는 다분히 인위적이다. 이러한 문제에 대하여는 호수의 종단면에 대하여 2차원으로 유동모형을 적용하여 수질을 모의하는 CE-QUAL-W2 모형과 같은 프로그램이 대안적으로 사용될 수 있다 (Cole and Buchak, 1995).

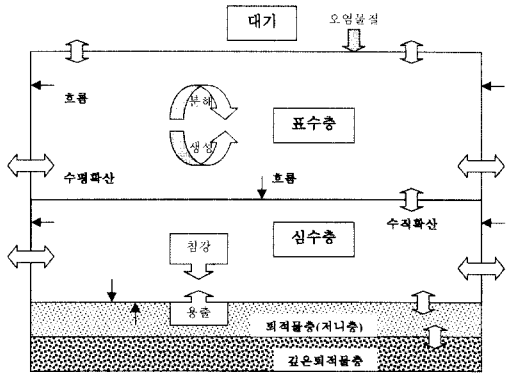

그림 3. 호수의 수질모델링의 기본 요소 개념도

호소는 하천과 달리 유속이 매우 작으므로, 바람이나 수온에 의한 유동에 의해 발생하는, 수평확산에 의한 물질 이동이 매우 중요하다. 그러나 이 역시 대부분의 경우 실측이 시행되지 못하는 경우가 대부분이며 주로 문헌 자료를 중심으로 시행착오적인 방법을 통하여 산정하고 있다.

(2) 오염부하 입력자료

수질농도의 변화에 가장 중요한 인자는 오염물질의 유입이다. 호소에 유입되는 오염물질은 주로 지천을 통해서 발생하나, 지하수의 유입, 강우시의 표면 유출, 대기 중의 먼지 그리고 호내에 퇴적되어 있는 물질의 재용출 등을 통해서 또한 전달되기도 한다. 호수로 유입되는 오염부하량은 비교적 파악하기 용이한 점오염원을 제외하고는 소위 원단위 기법을 이용하는 방법이 가장 널리 사용되고 있다. 그러나 원단위를 통해서 계산된 발생부하량은 유달률이라는 조절계수를 이용하

여 유달부하량으로 변환되어 사용된다. 이러한 방법에는 다음과 같은 문제점이 있다. 첫째, 원단위 방법은 지역 및 각종 조건에 따라 오차의 범위가 매우 크다. 둘째, 유달률은 산정된 발생량이 얼마만큼 하천에 도달할 것인지를 나타내는 항이지만 발생오염부하량과 실제 하천 도달량으로 나누어 계산되며 이 역시 원단위와 마찬가지로 오차를 증폭시키는 요인이다. 셋째, 비점오염원은 강우의 영향을 크게 받지만 이 방법은 계절적인 영향이 고려되어 있지 않다. 우리 나라의 환경부에서는 전국적인 수질감시망을 통하여 매달 수질을 측정한다. 그러나 수질이 측정된다 하여도 동시에 수량이 측정되지 않을 경우, 유입오염 부하량은 수질과 수량의 곱으로 나타나기 때문에, 단위시간에 유입되는 오염물질의 질량을 계산할 수 없다. 또한 우리나라의 대형호수에서는 유입량이 실측되는 곳은 찾아보기 힘들다. 따라서 각종 오염부하량이 어느 시기에 어떠한 양으로 호내로 유입되는지 정확하게 측정한 자료는 찾아보기가 불가능하다. 또한 호수의 내부에서 오염부하를 제공하는 퇴적물의 용출작용에 대하여는, 일부를 제외하고 퇴적물의 분포와 용출조건등이 실측된 예를 찾아보기 매우 어렵다(서동일, 1998). 이러한 상황같이 오염부하량이 정확하게 계측되지 않는 경우 수질모형을 보정하기 매우 어려울 뿐만 아니라, 올바르지 않은 정보로 인하여 수질모형의 매개변수들이 매우 왜곡되어 오히려 에러를 증폭시킬 수 있다.

(3) 수질모형의 보정을 위한 실측 자료

미국 EPA에서 개발된 QUAL2E(Brown and Barnwell, 1987) 또는 WASP5(Ambrose et al., 1993)와 같은 수질모형은 다양한 수질변수의 상호관계를 모의할 수 있도록 고안되어 있다. 그러나 수질모형에서 사용되는 각종 반응식은 모두 경험식이며 필요한 계수를 일일이 보정해 주어야 한다. 보정은 문헌에서 제공되는 값을 사용하여 시행착오적으로 실시하는 것이 일반적이나, 현장 및 실험실에서 측정하여 사용하는 것이 바람직하다. 이러한 보정 과정에서는 각각의 반응식에 사용되는 모든 항들의 의미를 완전하게 이해하는 것이 매우 중요하다. 올바르지 않은 매개변수를 선택하게 되면 그에 관련되는 수질변수가 연쇄적으로 영향을 받게 되고 수질 모형은 비정상적인 계산 결과를 생성하게 되며 이는 수질관리를 위한 의사결정과정에 심각한 오류를 불러일으킬 수 있다. 특히 호소의 경우 대부분의 수질자료는 표층수에 국한되는 경향이 있으며 따라서 깊은 수역 또는 심수층에 대한 수질모형의 보정이 매우 어려울 경우가 많다. 또한 호소의 수질은 계절적인 영향을 매우 크게 받는 곳이므로 최소한 월 1회 이상의 자료가 필요하다. 더욱이 홍수기에는 각종 부유성 폐기물과 밀도류의 이동에 따라 호수의 공간적 수질분포가 매우 급격하게 변화한다. 따라서 이러한 기간에는 측정빈도를 더욱 증가시켜야 한다. 그러나 홍수기에는 실측작업에 많은 위험이 따르고 경제적으로도 큰 부담이 될 수 있으므로 이러한 측정작업은 자동화 하는 것이 바람직하다 (서동일, 1997a).

(4) 기타 자료

위에 나열한 사항 외에 수질모의에 꼭 필요하나 추정에 그치는 자료들이 매우 많다. 예를 들어, 호내 소구간 사이의 흐름의 분포에 관련된 자료, 바람에 의한 영향에 관한 자료, 홍수에 의한 영향과 관련한 자료, 지하수의 유입과 관련한 자료, 생물의 종류에 따른 섭생특성 또는 먹이연쇄에 관련된 자료, 수층과 퇴적물층의 상호관계에 관련된 자료 또는 고형물질과 용존물질의 분율에 관한 자료 등이 그러한 범주에 속한다. 각종 반응의 계수들은 일종의 복합계수(limped parameter)로서 현장의 조건에 따라 포함하는 내용에 차이가 있으며 정확한 검증이 필요한 경우가 매우 많다. 수질 모델이 고려하는 요소가 자세할수록 요구되는 자료가 증가되며 적절한 수준의 복잡도를 선택하는 과정은 수질모델링 전문가의 몫이다.

4. 결론

모델의 사용은 다음과 같은 점에서 수질관리에 중요한 의의를 갖는다.

1. 일정 수자원계획이 환경에 미치는 영향의 예측

2. 각종 오염원의 이동과정에서 일어나는 현상의 이해
3. 수질관리에 중요한 현상 또는 지역들의 파악
4. 다양한 대안의 효과적 검토

수질을 예측하기 위하여 수질모델은 우리에게 가상의 상황을 요약하여 보여주는 중요한 수단이 된다. 수질모델을 사용하기 앞서 우선적으로 생각해야 하는 것은 달성하고자 하는 구체적인 목표이다. 이 목표는 대상 호소가 안고 있는 각종 문제점을 고려하여 설정되어야 한다. 경우에 따라서는 호수 전반에 걸친 연평균 농도만이 필요할 수 있으나 각 지점에 대한 일별 변화특성을 자세하게 계산해야 할 필요가 있을 경우도 존재한다. 앞서 언급한 WASP5와 QUAL2E 등의 수질모델 들은 비교적 자료요구도가 많은 편이며 다수의 경우에서 "검증된 수질모형"으로서 위 두 모형을 사용하는 것을 관찰할 수 있다. 그러나 실제로 위 모형들을 합리적으로 실행시킬 만한 자료를 확보하는 경우는 매우 드문 편이며 수질 모의 결과도 만족스럽지 못한 경우가 대부분이다. 이러한 경우 우리가 수질모형을 통하여 얻을 수 있는 정보의 신뢰도에는 심각한 의문이 제기될 수밖에 없다.

수질모델은 모델을 구성하는 사람의 현상에 대한 이해정도나, 가정 그리고 문제를 적절하게 다루는 데 필요한 여러 가지 제약조건(자료의 확보 가능성 등)에 따라 다양한 형태로 존재한다. 앞서 언급했지만 수질모델은 물지수지식에 근거한 방정식의 집합에 불과하다. Chapra(1997)는 "back-of-the-envelop modeling" 또는 "cartoon modeling" 이 매우 중요한 것을 강조한 바 있다. 상황에 따라 간단한 모형을 구성하여 적용하는 것이 더욱 바람직할 수 있으며 수질모델의 역할은 이러한 작업에서 더 큰 진가를 발휘하는 경우가 많다. 수질모델링은 현장의 수질변화 현상과, 각종 수질관리 기법, 그리고 컴퓨터에 관한 전문지식 등이 요구되는 종합적인 학문 분야이다. 기존에 실행 가능한 모형이 산재하고 컴퓨터 내에서 아무리 잘 실행된다 하더라도, 필요한 입력자료를 구성하고 계산결과에 대하여 분석하고 비판하는 능력이 존재하지 못하는 한 무용지물이 되고 만다. 수질모형의 합리적인 사용을 위하여는 이를 운용할 수 있는 적절한 인력의 확보가 가장 중요한 문제점으로 나타난다.

호수의 수질모형은 인터넷을 통하여 미국의 환경청(http://www.epa.gov) 또는 미군공병단 (http://www.wes.army.mil) 등에서 제공하는 모형을 구할 수 있으나 유럽, 호주 등지에서 개발된 모형은 구매해야 하는 경우가 대부분 이다(Wurbs, 1995). 그러나 일반적으로 미국에서 공개하는 프로그램들은 경제적인 부담이 없고 적용사례가 많으며 또한 계속적으로 관리가 되고 있으므로 많은 장점을 가지고 있다고 본다. 본 고에서는 지면 관계상 수질모델링에 관련하여 기술적인 면을 자세하게 언급하지 않았으나 추후의 기회를 통하여 거론될 수 있기를 기대하는 바이다.

참고문헌

한국수자원공사 (1997), 숫자로 본 수자원, 한국수자원공사.

서동일 (1997a), "호수의 성층현상 연속측정을 위한 자동구동장치의 개발", 대한환경공학회 춘계학술대회 초록

서동일 (1997b), 댐유역 오염물질의 유입특성에 관한 연구, 한국수자원공사 보고서

서동일 (1998)" 담수호의 성층현상에 의한 부영양화 특성과 수질관리 방안에 관한 연구", 대한환경공학회지, Vol. 20, No. 9, pp. 1219-1234..

Ambrose, R. B., T. Wool and J. Martin(1993), The Water Quality Analysis Simulation Program, WASP5, USEPA.

Brown, L.C., and Barnwell, T. O. (1987), The Enhanced Stream Water Quality Models QUAL2E-UNCAS: Documentation and User Manual, EPA/600/3-87/007.

Chapra, S. (1997), Surface Water-Quality Modeling, McGraw Hill.

Cole, T. and E. W. Buchak (1995), CE-QUAL-W2: A Two-Dimensional Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model, V. 2.0.

Wetzel, R. G.(1983), Limnology, 2nd Ed., Saunders College Pub.

Wurbs, R. (1995), Water Management Models A Guide to Software, Prentice Hall PTR