

한강 하류부에서의 수질모의를 위한 QUAL2E모형의 적용

한 건 연*, 송 계 우**, 백 경 원***, 김 상 호****

1. 서 론

인구의 증가와 도시집중, 산업의 발전은 필연적으로 용수수요의 증대를 초래하게 되었으며, 과거의 수질오염관리의 소홀등으로 격증하는 용수수요에 따른 하천수의 수질 문제가 크게 대두하게 되었다. 특히 한강 하류부와 같이 오염원과 취수장이 하천에 연하여 공존하는 곳에서는 이들 오염물질이 일단 하천에 유입되고 하류로 운송되어 가는 과정은 매우 복잡한 기구를 가진다. 하천에서 수질해석을 위한 수학적 모형은 Streeter-Phelps가 최초로, 하수처리장으로부터 방류되는 오염원의 자정능력을 평가하기 위하여 유도되었다. 그간 선진국에서는 이 식을 기본으로 한 기술한 많은 수학적 모형들이 개발되어 적용된 바 있다. 본 연구에서는 그 적용성이 널리 인정된 미국 EPA의 QUAL2E를 한강 하류부에 대하여 적용하여 실측자료를 중심으로 모형의 보정과 검증을 실시하였다. 이 구간에 대한 수리학적 흐름 해석결과를 기초로 하고 한강환경관리청의 수질측정자료를 이용하여 수질해석을 실시하였고, 이를 위해서 민감도 분석과 최적화 기법을 활용하였다. 1996년과 2001년 주요 지천에 대한 오염부하량 자료를 기초로 하고 주요 유량등급 및 지류에서의 처리도에 대하여 장래의 수질예측을 실시하였다.

2. QUAL2E 모형의 적용

2.1 모형의 원리

본 연구에 사용한 QUAL2E는 정상상태의 하천 1차원 수질해석을 위하여 표준적으로 적용될 수 있는 수질 모형으로서 13개 수질 오염인자의 시뮬레이션이 가능하고 점오염원 및

* 경북대학교 공과대학 부교수, 토목공학과
** 홍익대학교 공과대학 교수, 토목공학과
*** 홍익대학교 대학원 토목공학과 박사과정
**** 경북대학교 대학원 토목공학과 석사과정

비점오염원, 하천의 지류 및 용수취수등을 다양하게 고려하여 모델링할 수 있다. 하천에서의 물질전달 거동은 1차원적 해석에 의하여 (1)식과 같이 기술된다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (D \frac{\partial C}{\partial x}) - \frac{\partial (UC)}{\partial x} + Z \quad (1)$$

여기서, C : 단면평균의 오염물 농도 D : 종확산계수 U : 단면평균유속
 식 (1)에서 좌측항은 어느 지점에서 시간에 대한 농도변화율을 나타내며, 우측항은 순서대로 종확산항, 이송항, 각 오염물질간의 생화학적 반응을 포함한 유출입항을 각각 표시하고 있으며, 정상상태인 경우에는 $\partial C / \partial t = 0$ 으로서 표현된다.

2.2 한강 하류부에 대한 적용

모형의 적용대상은 한강본류부를 선정하였는데 그 대상하천구간은 팔당댐 직하류(고안)에서 인도교에 이르는 34.5 km 구간이다. 하도단면자료는 건설부와 서울특별시의 관련보고서로부터 수집하였다. QUAL2E의 모델링 대상하천은 전체구간을 길이 0.5km의 element 69개로 구성하고 다시 69개의 element를 지류 유입지점 및 잠실 수중보등을 고려하여 동일구간내에서는 수리학적으론 유사한 특성을 갖도록 8개의 구간으로 구분하였다. 본류로 유입되는 지천에 대한 하도단면자료가 불충분하므로 지천은 점오염원으로 유입되는 것으로 하였고, 각 수원지의 용수취수량도 고려하였다.

하천의 수리학적 부동류 해석을 위해서는 연속방정식과 운동방정식을 적용하였다. 흐름을 정상류 상태로 보면 하도내의 각 단면에서의 수위는 (2),(3)식에 의하여 결정된다.

$$F(h) = \left(\frac{Q^2}{A}\right)_{i+1} - \left(\frac{Q^2}{A}\right)_i + g\overline{A}_i (h_{i+1} - h_i + \Delta x_i \overline{S}_f) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{dF}{dh} = \left(-\frac{Q^2 B}{A}\right)_i + \frac{1}{2} g B_i (h_{i+1} - h_i + \overline{S}_f \Delta x_i) + g \overline{A}_i \left(-1 + \Delta x_i \left(\frac{dS_f}{dh_i}\right)\right) \quad (3)$$

常流의 경우에 있어서는 (2),(3)식의 계산은 하류단에서 상류방향으로 진행되는 데 비선형식에 대한 Newton-Raphson 방법을 적용하면 그 해를 구할 수 있다. 이제 상류단인 팔당댐에서의 방류량과 인도교의 수위자료를 기초로 하도내 각 지점에서의 수심, 통수단면적, 유속, 경심 등의 자료가 얻어지게 되고, 이 계산결과는 QUAL2E 모형 계산과정에 수리학적 영향인자의 기본자료가 된다.

수중보의 영향을 고려한 수중보 상류부에서의 부동류해석을 위해서 수중보에서의 자유유행형 율류수심을 한계수심으로 적용하였고 이 값을 기준으로 수중보 지점에서 상류방향

으로 부등류 계산을 수행하였다. 즉, 한계수심 발생시에 단면계수는 (4)식과 같은 비선형 대수방정식이 성립한다.

$$F(h) = A^{3/2} B^{-1/2} - \frac{Q/\sqrt{\cos \theta}}{\sqrt{g/\theta}} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{dF}{dh} = \frac{3}{2} A^{1/2} B^{1/2} - \frac{1}{2} \left(\frac{A}{B}\right)^{3/2} \frac{dB}{dh} \quad (5)$$

(4),(5)식의 해는 Newton-Raphson 방법에 의해서 weir의 율류수심을 구할 수 있다. '92 - '94년에 걸친 월평균 팔당댐 방류량 자료와 한강대교의 수위자료로부터 부등류 계산을 실시하여 그 결과를 reach 별로 회귀분석하여 수리학적 변수를 산정하였다. 이 경우에 팔당댐에서의 유량 범위는 150~480 m³/sec의 범위가 적용되었다. 수중보 고려에 따른 수리학적 변수산정 결과는 수중보 영향에 의해서 수심이 증대되고 유속은 크게 저하됨을 확인할 수 있었다.

2.3 반응계수의 추정

한강 본류부에 대한 최적의 반응계수를 추정하기 위하여 영향계수 매트릭스를 구성하였으며, BOD, DO의 반응계수에 대한 BFGS기법에 의한 최적화 해석을 실시하였다. 잠실수중보 상류부와 하류부에 대하여 반응계수의 특성이 수중보 상류부에서의 유속감소와 수심 증가로 인하여 상이할 것으로 판단되었으므로 두개의 구간에 대하여 다음과 같은 과정에 의하여 반응계수를 도출하였다.

2.4 모형의 보정 및 검증

모형의 보정은 실측자료를 적용하여 모형에 포함된 각종 반응계수를 추정하는 작업을 의미하며, 모형의 검증은 보정된 반응계수를 다른 조건하에서 적용성을 증명하는 것이다. 모형의 보정과 검증을 위하여, '94년 1월에서 8월까지의 한강 환경관리청에서 측정한 자료를 활용하였다. 즉, 본 연구에서는 8월 수질측정 자료를 사용하여 QUAL2E 모형의 매개변수를 최적화 기법에 의해서 추정하였고, 1월~7월의 유량 및 수질조건에 대하여 적용함으로써 검증을 실시하였다. 그림 1은 94년 8월의 BOD, DO에 대한 모형의 보정결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 모형의 계산치는 그 중단형상에 있어 실측치와 비교하여 잘 일치되고 있음을 알 수 있었다. BFGS기법에 의한 BOD와 DO의 계산오차 $\sum (e_1^2 + e_2^2)$ 는 표 1에서 보는 바와 같이 수중보 상류부에 대하여 0.082, 수중보 하류부에 대하여 0.116 으로서 각각 2-3회 반복계산후 계산을 마칠 수 있었다.

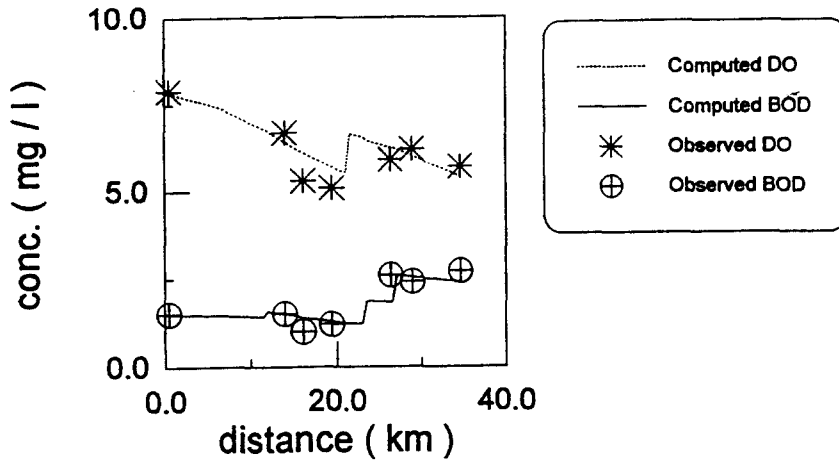


그림 1. 모형의 보정결과 (94년 8월)

표 1. 최적반응계수의 도출

< 수중보 상류부 구간 >

Iteration	K1	K3	K4	$\sum(e_1^2 + e_2^2)$
0	0.261	0.0	0.984	0.168
1	0.02	0.272	5.076	0.089
2	0.239	0.0	3.882	0.084
3	0.258	0.0	3.691	0.082

< 수중보 하류부 구간 >

Iteration	K1	K3	K4	$\sum(e_1^2 + e_2^2)$
0	0.261	0.0	0.984	0.168
1	0.35	-0.18	3.002	0.12
2	0.335	-0.17	2.958	0.116

모형의 검증은 '94년 1월~7월의 유량 및 수질자료를 활용하여 수행하였는데 월별 수질 측정일의 팔당댐에서의 방류량은 1월~6월까지 150~236 m³/sec로서 유량조건이 평균적으로 갈수량에 가까운 조건이었으나 94년 7월의 유량조건은 651 m³/sec로 크게 나타나 수질자료의 분석에서는 제외하였다. '94년 3월, 4월 및 5월의 구리, 암사, 구의, 독도, 보광, 노량진동의 지점에서의 수질해석 결과는 모형에 의한 계산치와 실측치와 비교적 잘 일치되고 있었다.

3. 장래수질의 모의

모형의 보정과 검증과정을 통하여 도출된 조건을 이용하여 서울시 및 구리시등의 관련 자료로부터 구한 오염부하량 자료를 기초로 하여 장래 수질을 모의하였다. 장래의 팔당댐의 방류량자료는 1981-1993년까지의 자료를 분석한 결과 갈수량 128 m³/sec로 적용할때

취수량이 1996년 및 2001년에 각각 80 m³/sec, 90 m³/sec로 취수영향이 과다하게 나타나 적절한 수질모의결과의 도출이 어려울 것으로 판단되었다. 따라서, 갈수량은 충주댐 완료 후인 1985~1988년의 갈수량이 214.9 m³/sec이므로 충주댐 완공 후의 상시유량인 200 m³/sec를 적용하였고, 평수량은 1981년 부터 1993년까지의 팔당댐의 년 평균 방류량인 470 m³/sec를 적용하였다. 장래의 팔당댐의 수질자료 중 BOD는 “팔당댐의 수질조사 및 평가”에서 제시된 관련보고서의 팔당댐 직하류부에서의 동절기를 제외한 년평균치의 수질 자료로서 갈수시와 평수시에 대하여 1996년에 각각 1.167 mg/l, 1.158 mg/l, 2001년에 각각 1.325 mg/l, 1.288 mg/l를 사용하였다. DO와 수온은 연관관계가 매우 크므로 BOD와의 일관된 자료특성을 유지하기 위해서 1991년~1994년의 동절기(12,1,2월)자료를 제외한 연 평균값인 9.58 mg/l와 17.52℃를 사용하였다.

장래의 수질모의는 1996년과 2001년도의 각 지류별 오염물 부하자료를 기초로 하여 팔당댐의 갈수량 및 평수량 조건에 대하여 실시하였다. 왕숙천, 탄천, 중랑천의 유입자료는 과거 5년간 이 지천에서의 갈수위 및 평수위자료와 향후 각 하수처리장에서의 유입되는 방류량을 합산하여 산정하였다.

팔당댐~인도교 구간에서 갈수량과 평수량에 대해 현재상태 처리시와 계획중인 2차 시설 완공시의 경우에 대한 수질해석을 실시하였다. 그림 2는 장래의 갈수기시에 대한 주요지점별 수질변동의 특성을 도시한 것이다. 특히 탄천 및 중랑천 유입후에 BOD가 악화되는 현상을 보이고 있는데 이는 이 구간에서의 오염부하량의 증가와 수중보 상류부에서의 취수량 증가로 인하여 회석에 따른 하천 자정능력이 크게 떨어진 것에 기인한 것으로 사료된다.

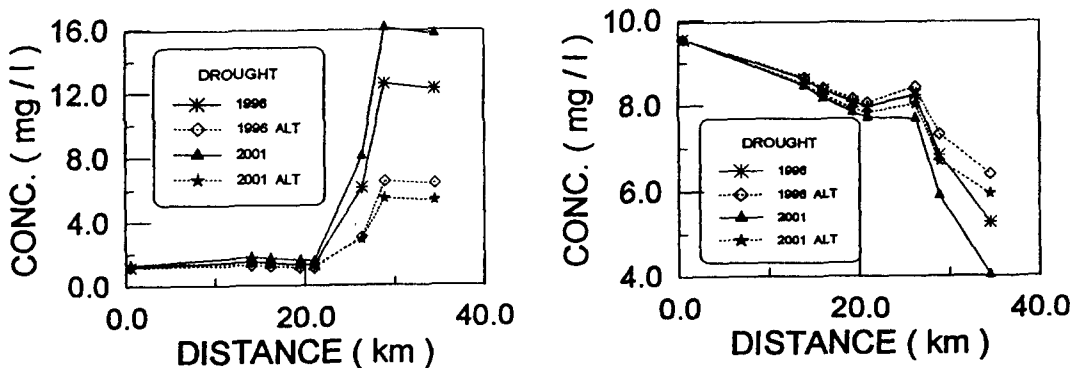


그림 2. 장래 수질모의 결과 (갈수기)

4. 결 론

(1) 팔당댐-인도교의 34.5km에 대한 부등류 해석결과 수중보의 영향으로 인하여 유속이 크게 저하되고 수심의 증가현상이 파악되어 이 구간에서의 수질해석에 큰 영향을 미칠 수 있는 수리학적 특성인자를 도출하였다.

(2) QUAL2E 모형에 의하여 예민도 분석을 실시하였고 중요한 영향계수들에 대하여 BFGS기법을 적용함으로써 최적의 반응계수를 도출하였다. 한강환경관리청의 수질측정자료를 기초로한 모형의 검정과 증명을 실시하였는바 계산결과는 실측자료와 비교하여 합리적인 범위내에서 일치되고 있었다.

(3) 1996년과 2001년 주요 지천에 대한 오염 부하량 자료를 기초로 하고 주요 유량등급 및 대안에 대하여 장래의 수질 모의를 실시하였다. 본 연구는 장래의 한강하류부의 수질 관리 대책수립에 기여할 수 있는 것으로 판단되었다.

5. 참고문헌

(1) Brown, R.T., and Barnwell. T.O., "Computer program documentation for the enhanced stream water quality model QUAL2E and QUAL2E-UNCAS", EPA/600-3-87/007, US Environmental Protection Agency, 1987

(2) Bowie, G.L., et al., "Rates, constants, and kinetics formulations in surface water quality modeling", 2nd ed., EPA/600/3-85/040, US EPA, 1985

(3) 구리시, 구리하수처리장 방류수 이송관련 타당성 조사 보고서, 1994

(4) 백경원, 김상호, 한건연, 송계우, "QUAL2E 에 의한 한강 하류부에서의 수질해석", 대한토목학회 논문집, Vol.15, No.2, 1995.

(5) 이길성, 수도권 광역상수도 5 단계 타당성조사 및 기본계획 (팔당호 수질조사 및 평가, 서울대학교 수공학연구소, 1993.

(6) 환경처, 한국환경연감, 1988-1995