

비점오염해석과 연계한 낙동강에서의 동적 수질모의

Dynamic Water Quality Simulation Considering Nonpoint Sources in Nakdong River

한건연*, 최현구**, 김지성***, 윤영삼****

Kun Yeun Han, Hyun Gu Choi, Ji Sung Kim, Young Sam Yun

요 지

최근 환경부에서는 낙동강 유역의 오염총량관리제도의 시행에 따라 이제까지의 배출구 수질기준으로부터 총량수질기준을 통한 수질관리를 실시하고 있다. 오염총량관리를 실행하기 위해서는 주요지천 및 폐수처리장에서 수질개선 및 비점오염원 관리가 선행되어야 하는데 이를 효율적으로 제어하기 위해서 낙동강 유역에 적합한 최적 수질해석 모델의 개발이 요구되는 상황이다. 수질모델의 가장 큰 목적은 유역으로부터 발생한 오염물이 하천으로 유입되었을 때 하천 수질 및 생태계의 수학적 표현을 통해 장래의 수질을 예측하고, 예측된 결과에 따라 합리적인 수질관리대책을 수립하는 것이다.

낙동강은 대표적인 수지상 하천망의 형태로서 댐 방류량 및 지류유입량은 본류 수계에 직접적인 영향을 미치며, 수질해석의 기본이 되는 수리계산에 매우 중요한 변수가 된다. 또한, 대구, 구미, 왜관, 김천 등에서의 오염부하가 금호강, 남강 등의 주요 지류를 통하여 본류부로 유입되고 있으며, 하류부 칠서, 원동, 매리, 물금 등에서는 대량의 하천수를 취수하여 부산, 울산, 마산, 창원 지역 등의 생활 및 공업용수의 원수로 사용하고 있다. 다시 말해서 댐 방류량, 낙동강 하구언의 수위조절, 지류 유입량, 비점원 유입량 등 계산영역 경계에서의 비정상상태의 수리조건과 수질관리 계획에 의해 일률적으로 오염이 부하되는 정상상태의 수질조건이 공존하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 낙동강 유역에 적합한 동적 수질모델을 개발하였다. 본 연구에서 개발된 수치모형은 갈수·저수조건 및 불규칙한 하도단면을 반영하고, 동적 상태의 댐 방류량, 낙동강 하구언의 수위조절 영향, 지류 유입량 등 다양한 하천조건에서 발생하는 동적 흐름을 안정적으로 해석하여 낙동강 수질해석의 신뢰도를 향상시킴으로서 낙동강에 유입된 오염물질이 수계에 미치는 영향을 정확히 분석하고자 하였다.

동적수질해석에 의한 모의결과는 유량의 경우 상류부분은 모의치와 실측치가 잘 일치하지만, 중류 이후 지류의 유입이 많아지면서 지류의 변화를 정확히 입력하지 못해 모의치와 실측치의 차이가 발생한다. BOD의 경우는 수질이 양호한 상류지역은 모의치와 실측치가 잘 일치하지만, 오염원의 유입이 많은 중류지역부터는 실측치와 차이를 나타내다가 하류지역에서 다시 비교적 일치함을 알 수 있다. TN의 경우는 전반적으로 실측치보다 높게 모의되었고, TP는 전반적으로 실측치와 비교하여 잘 모의되었다.

본 연구에서 구축한 동적 수리해석모형 및 동적 수질해석모형은 낙동강 유역에 대해 유량 및 수질 등의 실제 하천의 경향에 비교적 잘 반영하므로 오염물총량규제에 따른 합리적인 하천 수질관리대책을 수립하는데 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 비점오염원, 낙동강, DyQUAL, DyHYD

* 정희원 · 경북대학교 토목공학과 교수 · E-mail : kshanj@knu.ac.kr
** 정희원 · 경북대학교 토목공학과 박사과정 · E-mail : honorguard99@msn.com
*** 정희원 · 한국건설기술연구원 수자원부 Post-Doc. · E-mail : jisungk@gmail.com
**** 낙동강물환경연구소 연구사 · E-mail : ysyoon_3_sf@hanmail.net

1. 서론

낙동강유역에서의 이제까지의 모델링 기법들은 하천수량과 수질의 관계를 정량적으로 분석하여 장·단기적인 수질변화예측을 위해 유용하게 사용되어 왔으나 대부분이 정상상태의 모형이어서 댐의 방류량의 변화와 강우-유출에 따른 하천의 동적 수질변화를 예측하거나 호우시 유입되는 비점원오염부하와 같은 급격한 흐름변화를 해석하기에 어려움이 있었다. 또, 기존의 수질관리는 최근의 낙동강 오염사태들과 새롭게 운영중인 댐 관리체제에 있어 미흡한 점을 들어내고 있다.

따라서 본 연구에서는 댐으로부터의 방류양상을 고려하여 낙동강에서의 오염원이 지류 및 폐수처리장 등을 통해 오염물질이 유입되고 있고 하류부에서는 다량의 취수가 이루어지고 있는 오염원과 취수원이 공존하고 있는 상황과 강우 및 유출에 따른 하천의 동적 수질변화를 반영할 수 있으며, 비점오염원까지 동시에 모의할 수 있는 과학적이고 정교한 수질예측체제를 구축하고자 함에 그 목적이 있다.

2. 동적 수질해석모형의 기본이론

2.1 기본방정식

오염물질의 질량보존방정식은 흐름방정식을 구하는 것과 같은 방법을 사용하여 식 (1)로부터 구할 수 있다.

$$\int_{CV} \frac{\partial a}{\partial t} dV + \int_{CS} a(\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) dA = S^* \quad (1)$$

여기서 a 는 오염물질의 농도, S^* 는 용출소멸량이다. 이를 1차원 모형화시키면 다음과 같다.

$$\frac{\partial(Aa)}{\partial t} + \frac{\partial(UAa)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(DA \frac{\partial a}{\partial x} \right) + qa + S^* \quad (2)$$

여기서 D 는 확산계수, q = 측방향 유입수의 농도이다.

초기조건과 경계조건은 식 (3), (4)와 같다.

$$a(t = t_0, x) = a_i(x) \quad (3)$$

$$a(t, x = 0) = a_u(t), \quad a(t, x = L) = a_d(t) \quad (4)$$

2.2 계산 알고리즘

지배방정식 (1)로부터 S^* 를 현재 농도의 1차항과 상수항으로 분리한 후, chain rule을 적용한 후 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial a}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial a}{\partial x} = D \frac{\partial^2 a}{\partial x^2} + \frac{q}{A} (y - a) - K_s a + S \quad (5)$$

$$\bar{u} = U - \left(\frac{\partial D}{\partial x} + \frac{D}{A} \frac{\partial A}{\partial x} \right) = U - \frac{\partial D}{\partial x} + \frac{D}{A} \frac{\partial A}{\partial x} \quad q \quad (6)$$

여기서, K_s 는 생화학적 생성소멸률계수, S 는 생화학적 용출소멸량이다. 식 (5)의 좌변(이송항)은 4차의 정도를 가지는 Holly-Preissmann 방법을 사용해서 구한다. 그리고 여기에 우변의 둘째(횡방향 유입항), 셋째(감소항), 넷째(용출소멸량)를 더한 후에 첫째(확산)항에 대해 음해법을 사용해서 구함으로써 전체적인 계산을 수행하게 된다.

3. 낙동강 유역에 동적 수리모형의 적용

3.1 대상구간과 적용기간, 경계조건

대상구간은 낙동강 전역인 안동댐 직하부부터 경상남도 김해시 대동면 원촌양수장(낙본K)까지 약 320km 를 모의 대상구간으로 선택했으며, 적용기간은 저수량과 갈수량이 나타나는 2005년과 2006년의 봄을 설정하였다.

그림 1과 같이 동적수질해석을 하기 위하여 정적모의를 선행하여 매개변수를 검·보정하였다. 적용대상 물질은 BOD와 TN, TP를 모의하였으며, 검증은 낙동강물환경연구소에서 실측한 8일 실측치 자료를 사용하였다. 상류단 경계조건으로는 안동댐과 임하댐의 일 방류량 자료를 사용하였으며, 하류단 경계조건으로는 낙본 K의 일수위자료를 사용하여 일모의를 실시하였다.

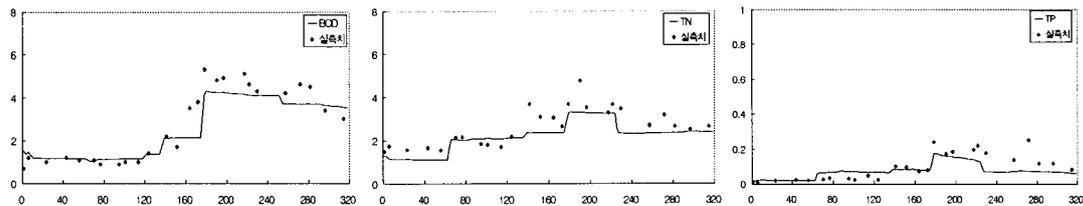
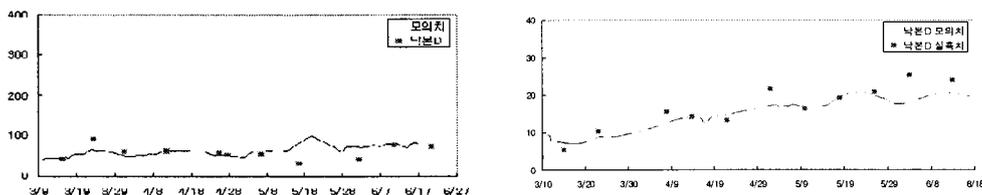


그림 1. 정적모의를 통한 검·보정('05년도)

3.2 동적흐름 해석결과 비교

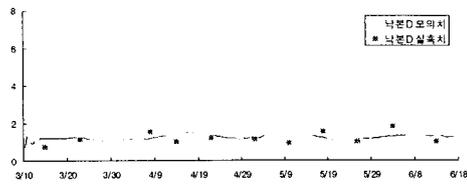
그림 2와 3은 각각 2005년과 2006년의 대상기간내 모의결과를 도시한 것이다. 2005년의 경우 유량은 30~300cms로 비교적 저유량을 나타내며 상류와 하류에서 많은 차이가 있다. 상류부분은 모의치와 실측치가 잘 일치하지만, 중류 이후 지류의 유입이 많아지면서 지류에서의 농도변화를 정확하게 입력하지 못해 모의치와 실측치의 차이가 발생한다. 수온의 경우 하류지역으로 갈수록 실측치의 경향은 따라가고 있으나 어느 정도 차이를 보인다. BOD의 경우는 수질이 양호한 상류지역은 모의치와 실측치가 잘 일치하지만, 오염원의 유입이 많은 중류지역부터는 실측치와 차이를 나타내다가 수질이 비교적 양호해지는 하류지역에서 다시 일치함을 알 수 있다. 실측된 자료를 입력자료로 사용을 하였으나, 모의결과는 관측치와 차이가 나는 것은 구간 내에 비점오염원의 영향과 BOD에 민감하게 반응하는 조류의 영향이라 판단된다. TN의 경우는 전반적으로 실측치보다 높게 모의되었고, TP는 전반적으로 실측치와 비교하여 잘 모의되었다.



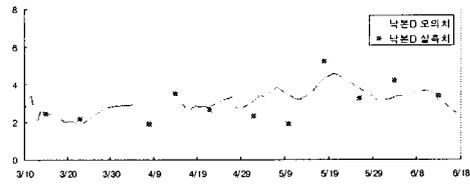
(a) 유량

(b) 수온

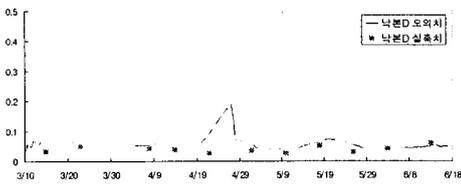
그림 2. 낙본D 동적수질 해석결과(2005년)



(c) BOD



(d) TN

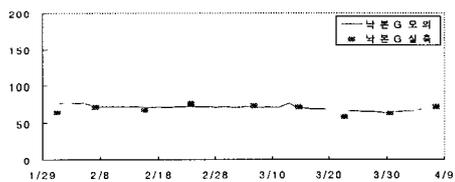


(e) TP

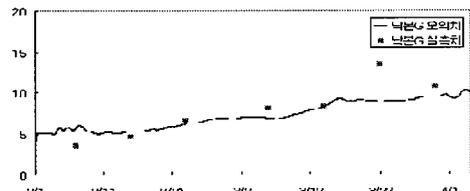
그림 2. (계속)

2006년 모의 결과는 유량의 경우 30~100cms로 2005년 모의보다 많이 적어 전형적인 갈수기 때의 모의이다. 유량은 모의치와 실측치가 잘 일치하고 있다. 수온의 경우는 3월 중순까지는 모의치와 실측치가 잘 일치하지만 3월 말부터 수온이 급격히 상승하는 경향을 따라가고는 있으나 정확히 일치하지는 못하고 있다.

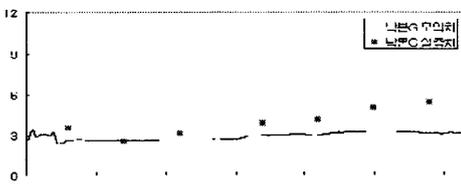
BOD의 경우는 2005년과 마찬가지로 수질이 양호한 중류까지는 일치하지만 금호강 합류 후부터는 모의치와 실측치간에 격차가 심해져 비점오염원의 영향이 있다고 판단되며, TN과 TP의 경우는 모의치가 실측치의 추세를 쫓아간다고 판단된다.



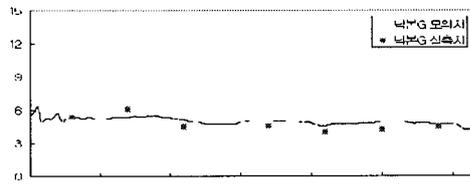
(a) 유량



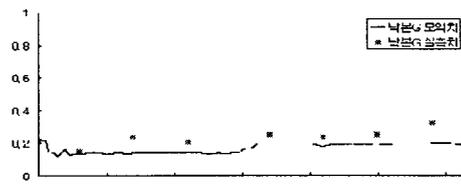
(b) 수온



(c) BOD



(d) TN



(e) TP

그림 3. 낙본G 동적수질 해석결과(2006년)

4. 비점오염원의 영향을 고려한 수질해석

비점오염원의 영향과 하천수질해석을 연계하기 위하여 주요지류에 대한 SWAT 모의 결과를 DyQUAL과 연계하여 해석하였다. 동적 수질해석의 결과 금호강이 유입하는 구간에서 수질계산결과와 실측자료의 편차가 큰 것으로 나타났으므로 금호강의 유역수질해석 결과를 하천수질을 위한 입력자료로 하고 모의를 실시하였다.

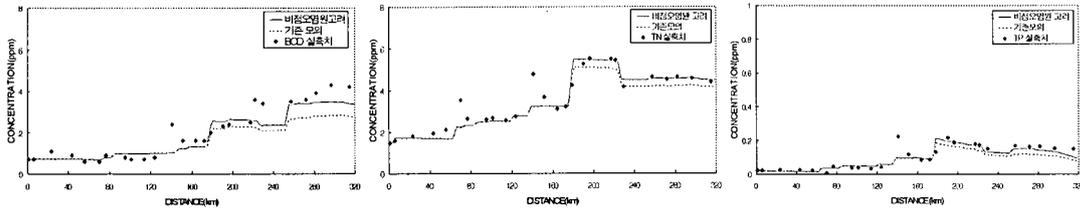


그림 4. 비점오염원과 연계한 수질해석

5. 결론

낙동강 유역에 적용할 수 있는 모형으로서 실시간 하천 수질해석 모형을 개발하였다. 이를 위해서 갈수-저수조건 및 불규칙한 하도단면을 반영하고, 댐 방류량, 낙동강 하구언의 수위조절 영향, 지류 유입량 등 다양한 조건에서 발생하는 동적 흐름을 안정적으로 해석하여 낙동강 수질해석의 신뢰도를 향상시킴으로서 실시간으로 낙동강에 유입된 오염물질이 수계에 미치는 영향을 정확히 분석하였다.

동적수질해석에 의한 모의결과는 유량의 경우 상류부분은 모의치와 실측치가 잘 일치하지만, 중류 이후 지류의 유입이 많아지면서 지류의 변화를 정확히 입력하지 못해 모의치와 실측치의 차이가 발생한다. BOD의 경우는 수질이 양호한 상류지역은 모의치와 실측치가 잘 일치하지만, 오염원의 유입이 많은 중류지역부터는 실측치와 차이를 나타내다가 하류지역에서 다시 비교적 일치함을 알 수 있다. TN의 경우는 전반적으로 실측치보다 높게 모의되었고, TP는 전반적으로 실측치와 비교하여 잘 모의되었다.

본 연구에서 구축한 동적 수리해석모형 및 동적 수질해석모형은 낙동강 유역에 대해 유량 및 수질 등의 실제 하천의 경향에 비교적 잘 반영하므로 오염물총량규제에 따른 합리적인 하천 수질관리대책을 수립하는데 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2007년도 낙동강 수계 관리위원회 환경기초 조사사업의 「주요 비점오염원 유출 장기모니터링 및 저감기법 연구」에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

1. 낙동강수계관리위원회, 낙동강물환경연구소 (2004). 낙동강 유역에 적합한 수질예측모델 개발.
2. 낙동강수계관리위원회, 낙동강물환경연구소 (2006). 낙동강 유역에 적합한 수질예측모델 개발.
3. 한건연 (1991). 낙동강 중류부에서의 최적수질관리기법의 개발, 한국학술진흥재단 연구보고서.
4. Thomann, R.V. and Mueller, J.A. (1987). *Principles of Surface Water Quality Modeling and Control*, Harper and Row, New York.
5. U.S. Army Corps of Engineers (1995). CE-QUAL-RIV1 : A Dynamic, One-Dimensional (Longitudinal) Water Quality Model for Steams.