

동적수질해석모형의 개발과 낙동강에의 적용

Development and Application of Dynamic Water Quality Model in Nakdong River

권 나 영* / 최 현 구** / 유 재 정*** / 한 건 연****

Kwon, Na Young / Choi, Hyun Gu / Yu, Jae Jung / Han, Kun Yeun

Abstract

The objective of this study is to develop an accurate and stable dynamic water quality model which is capable of reflecting various flows and irregular cross sections and handling numerical oscillations under the low flow conditions. In order to solve the oscillation problem under the low flow conditions, diffusive wave method was applied to the low flow condition in developing a hydraulic model, DyHYD. DyQUAL is also developed as a water quality model to calculate up to 12 water quality variables including autochthonous BOD, water temperature, DO, TN and TP. The developed model is applied to both hypothetical river channels and actual Nakdong river watershed. Additionally, the applicability and reliability of the models are verified by comparing simulation results with observed values. Nash-Sutcliffe coefficients are estimated by comparison between simulation results and observed values. In the calibration and verification process, the coefficients varies from 0.391 to 0.591 and 0.704 to 0.902 for discharge, BOD, TN and TP, respectively.

Keywords : DyHYD, DyQUAL, Dynamic water quality model, Nakdong river

요 지

본 연구의 목적은 저유량에서 발산하는 문제를 해결하여 다양한 흐름과 불규칙한 하도단면을 반영하는 안정적이고 정교한 동적수질해석모형을 개발하는데 있다. 이에 본 연구에서는 기존 모형들의 저유량에서 발산하는 문제를 해결하고자 확산과 운동방정식 기법을 이용하여 수리해석모형인 DyHYD를 개발하였으며, 수질해석모형은 자생 BOD와 수온, DO, TN, TP 등 12가지 수질농도를 계산할 수 있는 DyQUAL을 개발하였다. 개발된 모형의 적용성을 검토하기 위하여 가상하도 및 실제 낙동강유역에서 모의를 수행한 후 실측치와 비교·검토함으로써 모형의 적용성과 신뢰성을 검토하였다. 모형의 수행결과를 관측치와의 비교를 통해 Nash-Sutcliffe 계수를 산정하였으며, 보정과정에서는 유량과 BOD, TN, TP의 Nash-Sutcliffe 계수는 0.391에서 0.591의 범위를 나타내며, 검증과정에서는 0.704에서 0.902의 범위를 나타내었다.

핵심용어 : DyHYD, DyQUAL, 동적수질해석, 낙동강

* 경북대학교 공과대학 건축·토목공학부 석사과정
Master Course, School of Archi. & Civil Engineering, Kyungpook National Univ., Daegu 702-701, Korea
(e-mail: nyk8105@naver.com)

** 교신저자, 경북대학교 공과대학 건축·토목공학부 박사과정정수료
Corresponding author, Ph.D., Candidate, School of Archi. & Civil Engineering, Kyungpook National Univ., Daegu 702-701, Korea
(e-mail: honorguard99@msn.com)

*** 국립환경과학원 낙동강물환경연구소 연구관
Master researcher, Nakdong River Water Quality Research Center, National Institute of Environmental Research, Goryeong 717-873, Korea (e-mail: youjj@korea.kr)

**** 경북대학교 공과대학 건축·토목공학부 교수
Professor, School of Archi. & Civil Engineering, Kyungpook National Univ., Daegu 702-701, Korea
(e-mail: kshanj@knu.ac.kr)

1. 서론

수질해석 모델의 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. 특히, 낙동강 유역의 경우, 대구, 구미, 왜관, 김천 등에서의 오염부하가 급호강, 남강 등의 주요 지류를 통하여 본류부로 유입되고 있으며 하류부 철서, 원동, 매리, 물금 등에서는 많은 양의 하천수를 취수하여 부산, 울산, 마산, 창원 지역 등의 생활 및 공업용수의 원수로 사용하고 있는 실정이다. 또한, 낙동강 유역에서 발생한 오염 상태와 상·하류간의 물 사용에 대한 이점을 고려할 때 낙동강 오염총량관리제도의 시행과 더불어 이 유역에서의 효율적인 수질관리 기법의 개발이 절실히 요구되고 있다. 특히, 예기치 못하게 허용기준을 초과한 과도한 오염 부하량이 발생할 경우 이로 인한 하천영향 파악은 필수적이다.

국내하천 유역에서의 이제까지의 수질해석은 주로 부등류 해석에 의해 하천 흐름특성을 파악하고, 이를 외국에서 개발한 수질해석 모델에 적용하여 해석하는 단순연구에 그쳐 낙동강 하천수질-생태시스템 분석을 위해서 요구되고 있는 다양하고 정교한 해석결과를 제시하지 못하고 있는 실정이다. 낙동강 유역에서는 주요 댐의 방류량 및 지류 유입량, 낙동강 하구언의 수위조절 영향을 포함하여 수질해석을 실시하여야 하는데, 이를 위해서 연속방정식, 운동량 방정식 및 수질방정식에 근거하여 낙동강 유역 특성에 적합한 동적수질모델의 개발이 필요한 상황이다.

국외에서 동적수질해석에 대한 연구는 Rochelle *et al.* (2006)이 CE-QUAL-RIV1 모형에 pre/post-process를 강화한 EPD-RIV1 모형을 이용하여 용존고형물, 염, 염화물, 나트륨, TP에 대해 2003년과 2004년에 거쳐 동적수질모델링을 수행하였는데, 국내에서 연구가 활발한 CBOD 모델링은 수행하지 않았다. Parker *et al.* (2007)은 동적하천수질해석 모형인 CE-QUAL-RIV1과 유역 모형인 AnnAGNPS 모형을 연계하여 다양한 기후 시나리오에 대한 수질관리를 고찰하였다. Zhang *et al.* (2008)은 Preissmann 음해 기법을 이용하여 WASP 모형을 기반으로 동적수질해석 모형을 개발하였는데 수리해석과 수질농도의 모의에서 좋은 결과를 나타내고 있으나 CBOD 모의에서 합리적으로 실측결과를 재현하지 못하고 있으며, 수질농도 계산에 진동이 발생하는 문제점이 있다.

국내에서 동적수질해석에 대한 연구는 고익환 등 (2005)이 CE-QUAL-RIV1 모형을 이용하여 대청댐 하류에 대한 수질변동을 모의하였다. 또한 CE-QUAL-

RIV1을 기반으로 윈도우체계의 그래픽 임출력프로세스로 보완한 KORIV1 모형을 이용하여 정세웅 (2004)이 저수지 플리싱 방류효과 분석을 위한 연구를 수행하였으며, 노준우 등 (2008)이 섬진강댐의 방류량 증가에 따른 하천수질 변동을 연구하였으며, 노준우 등 (2008)이 대청댐의 방류량 증가에 따른 하천 수질 변동을 연구하였다.

이에 본 연구에서는 국내하천 유역에 적합한 동적수질모델을 개발하고자 한다. 본 연구에서 개발된 수치모형은 기존의 CE-QUAL-RIV1H 모형의 저유량에서 발산하는 문제를 해결하고 안정적인 수리계산을 실시하기 위하여 한계류 영역에서 확산과 방정식을 이용하는 LPI (Local Partial Inertia)기법을 적용하는 FLDWAV 모형을 기반으로 하여 DyHYD 모형을 개발하였다. 수질해석모형은 CE-QUAL-RIV1Q에 자생 BOD를 계산하도록 수정하여 DyQUAL 모형을 개발하였다. 개발된 동적수질해석 모형은 갈수·저수조건 및 불규칙한 하도단면을 반영하고, 동적상태의 댐 방류량, 낙동강 하구언의 수위조절 영향, 지류 유입량 등 다양한 하천조건에서 발생하는 동적흐름을 안정적으로 해석가능하다. 또한, 모형의 GUI를 구성하여 post-process 기능을 강화하여 각 농도별 그래프 및 산점도와 상관계수 (Correlation coefficient), Nash-Sutcliffe 계수를 나타내어 수질해석의 신뢰도를 향상시켰다. 모형의 적용성을 검토하기 위하여 가상 균일하도에서 해석해와 모의결과를 비교하였으며, 낙동강에 적용에서는 2008년 자료를 이용하여 매개변수의 보정을 거쳤으며, 검증을 실시하여 모형의 신뢰성과 안정성을 검토하였다.

2. 모형의 특성 및 지배방정식

본 연구에서 개발된 모형은 수리 및 수질모형의 2가지 독립적인 모듈로 구성되어 있으며 동역학 방정식을 풀이한 수리해석 결과를 바탕으로 수질모의를 수행한다. 기존의 CE-QUAL-RIV1H 모형의 저유량에서 발산하는 문제를 해결하고 안정적인 수리계산을 실시하기 위하여 한계류 영역에서 확산과 방정식을 이용하는 LPI 기법을 적용하는 FLDWAV 모형을 기반으로 코드 수정을 실시하여 DyHYD 모형을 개발하였다. 또한 CE-QUAL-RIV1H 모형에서 단면을 직사각형 또는 사다리꼴로 단순화하여 모의에 활용함으로 발생하는 오류를 극복하기 위하여 FLDWAV 모형과 같이 단면을 수심방향으로 8개로 분할하여 각각의 표고와 하폭, 사수역을 입력하여 불규칙한 자연하도를 반영하도록 구성하였다. 수리해석을 통해서 유량, 수속, 단면적, 수심 등의 수리학적 인자들을 파악한 다음 이 결과를 바탕으로 이

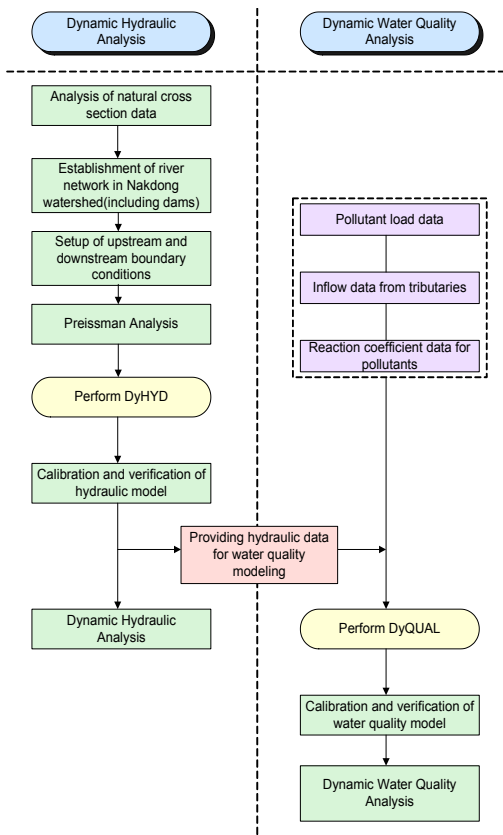


Fig. 1. Concept of Dynamic Water Quality Model

송확산 방정식에 의한 수질해석을 수행하게 된다. 수질 해석 모형은 수온, CBOD, 용존산소, 유기질소, 암모니아성 질소, 질산성 질소, 유기인, 용존인, 조류, 용존철, 용존망간 및 대장균류와 같이 12가지 수질 항목에 대한 모의가 가능하다.

Fig. 1은 동적수리해석모형과 동적수질해석모형의 연계과정과 동적수질해석의 절차를 나타내고 있다. 동적수질해석모형은 수리해석모형에서 계산된 수리학적 흐름특성자료를 이용하게 되는데, 수리계산의 결과를 수질해석에서 연계할 수 있도록 모형의 GUI (Graphical User Interface)에서 구성하였다.

Fig. 2는 모형의 GUI를 구성하여 수리 및 수질모형의 입출력 자료처리 화면 및 효율계수, 상관계수, 산점도 처리 화면을 제시하였다. 수리해석에 필요한 자료로는 상하류 경계조건, 하도단면자료, 지류유입량자료 등을 입력하여야 한다. 수리모형을 실행하면 유량, 유속, 수위 등의 항목에 대하여 지점별 또는 날짜별로 그래프를 통해서 수리해석 결과를 확인할 수 있으며, 관측자료가 있을 경우 관측자료를 불러들여 모의결과와 비교가 가능하다.

수질해석에 필요한 자료는 상류 경계조건, 지류 유입농도 자료, 각 단면별 초기농도 자료와 기본적인 매개변수 등으로 구성되며, 모의 대상 수질항목을 지정하고 수질모의를 수행하게 된다. 수리해석 모형과 마찬가지로 수질변동 분석결과를 지점별 혹은 시간별로 확인할 수 있으며, 실측자료를 불러들여 비교가 가능하다.

효율성 평가 탭을 선택하여 관측자료와 모의결과와의 비교가 가능하며, 유량과 BOD, TN, TP 등 관측자료가 존재하는 자료들에 대해서는 산점도와 상관계수, Nash-Sutcliffe 계수를 제시하여 수행된 모의에 대한 정확도와 신뢰도를 평가할 수 있다.

2.1 DyHYD 동적수리해석 모형의 지배 방정식

1871년 Barre de Saint-Venant에 의해 개발된 1차원 부정류 흐름에 대한 연속 및 운동량 방정식이 지금은 St. Venant 방정식으로 알려져 있다. St. Venant 방정식은 직선 개수로 하도에 대한 흐름방정식으로 하도가 직선이라는 가정이 포함되어 있다. 또한, 운동량 방정식에서 단면의 급확대나 급축소에 의한 에너지 손실이 고려되어 있지 않다. 그러나 자연하천은 하도 흐름을 따라서 일정하지 않은 속도분포를 가지며, 단면에 따라서는 수풀이 우거진 홍수터나 협곡 등에서의 지류 단면을 포함하는 부분도 있을 수 있다. 또한 하도는 자연적이든 인위적이든 좁은 축소부가 발생할 수 있다. 이러한 하천에서의 여러 가지 특성들을 고려할 수 있기 위해서는 St. Venant 방정식의 확장이 필요하다. 확장된 St. Venant 방정식은 홍수터 및 지류단면의 흐름, 사행하천, 단면축소·확대 등을 고려할 수 있다 (DeLong, 1986). 확장된 St. Venant 방정식 (Fread, 1988)은 Eqs. (1) and (2)로 표현된다.

$$\frac{\partial(s(A + A_o))}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

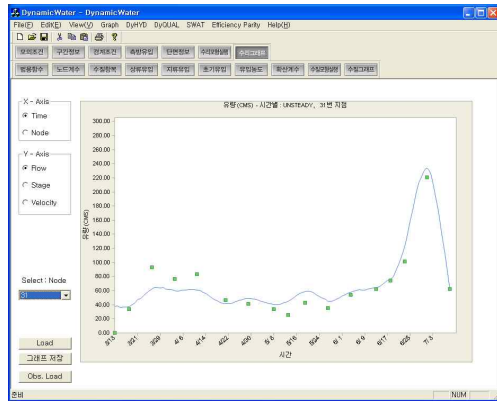
$$\frac{\partial(sQ)}{\partial t} + \frac{\partial(\beta Q^2/A)}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial H}{\partial x} + S_f + S_e \right) = 0 \quad (2)$$

여기서, A 는 흐름 단면적이고, A_o 는 지류단면적을 나타내며, g 는 중력가속도를 나타낸다. H 는 수리수심을 나타내며, β 는 운동량 보정계수를 나타내며, s 는 사행계수를 나타낸다. S_f 는 마찰경사를 나타내며, S_e 는 단면 확대·축소에 의한 손실경사를 나타낸다.

St. Venant 방정식은 쌍곡선형, 비선형, 편미분계함수로서 특수한 경우를 제외하고는 해석해가 존재하지 않는다. 그러나 여러 수치해석 기법에 의해 근사해를 얻을 수 있다. 유한차분 기법에서는 미분방정식이 차분



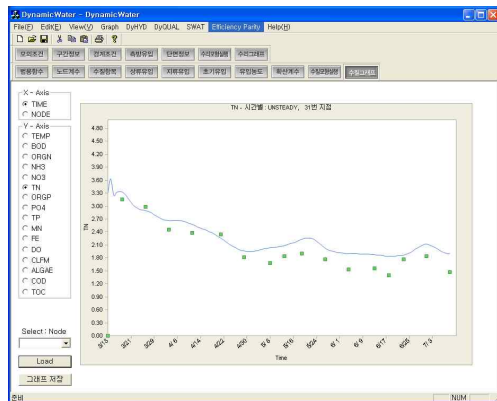
(a) Pre-Processor of DyHYD



(b) Post-Processor of DyHYD (Graph)

수질계수 - 설명	값	설명	값
생물학적 반응 속도보정계수	1.047	보통 하천의 할당률 계수	0.100
유량에 상대적 온도 보정계수	1.003	최대 할당률 (연하천) 할당률 DO 보정	0.500
유량에 상대적 산소량	1.024	최대 할당률 (연하천) 할당률 산소량 보정	0.100
하상에서 생물학적 반응 속도보정계수	1.074	최대 할당률 (연하천) 할당률 산소량 보정	0.100
단위 흐름당 질소 할당	0.913	보통 하천의 질소 할당률 계수	0.700
단위 흐름당 인 할당	0.956	보통 하천의 인 할당률 계수	0.950
유량에 상대적 온도 보정	0.920	유량에 상대적 온도 보정	0.920
유량에 상대적 산소량	4.500	보통 하천의 산소량 할당률 계수	0.000
단위 흐름당 질소 할당	1.950	하상 할당률 계수	0.000
단위 산소량당 질소 할당률 (산소량당 질소 할당)	0.140	유량에 상대적 온도 보정	0.950
단위 산소량당 질소 할당률 (산소량당 질소 할당)	2.000	보통 하천의 인 할당률 계수	0.960
유출시간	17.000	상하천의 유출 시간 (일) 할당률 계수	1.000
유출시간	0.230	보통 하천의 유출 시간 (일) 할당률 계수	0.054
ALPHA	20.000	유출 시간 (일) 할당률 계수	0.100
RCOD1	3.000	유출 시간 (일) 할당률 계수	0.025
RCOD2	2.000	유출 시간 (일) 할당률 계수	6.000
TIC	8.600	유출 시간 (일) 할당률 계수	200.000
유출 시간	0.000	유출 시간 (일) 할당률 계수	0.000
유출 시간	0.000	유출 시간 (일) 할당률 계수	0.000
유출 시간	0.000	유출 시간 (일) 할당률 계수	0.000
유출 시간	23.000	유출 시간 (일) 할당률 계수	0.900
유출 시간	10.000	유출 시간 (일) 할당률 계수	0.000

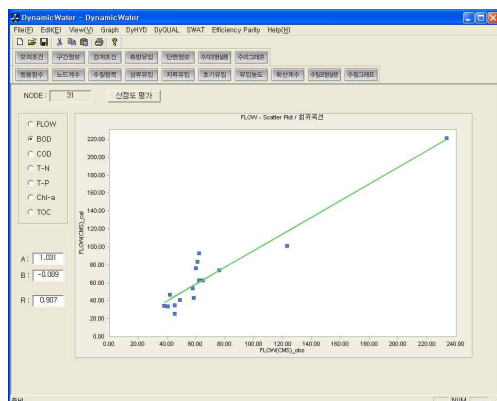
(c) Pre-Processor of DyQUAL



(d) Post-Processor of DyQUAL (Graph)

NODE	YEAR	MON	DAY	FLOW	BOOD	COD	TN	CHla	TOC					
8	3	18	27.730	34.008	1.103	1.100	1.576	3.323	3.154	0.025	1.675	5.600	2.16	
3	26	62.141	52.000	1.001	1.000	3.719	3.000	2.886	2.977	0.042	0.059	3.200	3.100	2.22
4	2	60.861	78.107	1.270	1.200	2.220	2.600	2.600	2.600	0.020	0.054	2.400	4.800	2.48
4	11	61.157	63.069	2.768	3.100	6.923	3.300	2.560	2.377	0.037	0.039	3.917	5.800	5.11
4	20	61.791	65.000	0.926	0.900	2.011	3.300	2.254	2.344	0.044	0.044	2.500	4.800	1.25
4	29	60.802	60.999	0.777	0.700	2.499	3.300	1.905	1.879	0.034	0.026	1.061	1.100	1.42
5	8	60.795	33.000	0.762	0.700	2.371	3.300	1.929	1.921	0.021	0.040	1.663	3.900	1.16
5	13	65.020	25.514	0.863	0.700	3.050	3.300	2.092	1.863	0.051	0.028	2.910	5.100	1.16
5	19	60.971	62.000	1.296	1.000	4.319	3.300	2.230	1.902	0.046	0.046	3.044	3.200	2.61
5	27	65.296	34.001	0.957	1.000	3.499	3.700	2.024	1.764	0.043	0.044	3.701	7.800	2.01
6	4	62.979	54.076	1.192	1.000	3.399	3.300	1.902	1.902	0.046	0.046	3.044	3.400	2.20
6	13	64.520	62.419	0.990	1.000	3.496	3.700	1.874	1.903	0.047	0.039	3.153	3.000	2.10
6	19	70.200	72.001	1.162	0.800	4.237	3.700	1.895	1.907	0.021	0.041	4.361	3.600	2.54
6	23	122.889	101.137	1.236	0.800	4.054	3.700	1.896	1.795	0.057	0.056	5.944	7.100	2.44
7	1	234.630	235.000	0.980	0.900	3.870	4.000	2.119	1.926	0.060	0.060	7.756	3.600	2.44
7	9	62.123	62.419	0.874	1.100	3.579	3.100	1.907	1.474	0.056	0.044	6.093	16.200	2.25

(e) Post-Processor of Relative Coefficients



(f) Post-Processor of Scatter Plot

Fig. 2. Pre/Post-Processor of DyHYD, DyQUAL

화된 비선형 대수방정식으로 표현되어진다. 이러한 대수방정식계는 초기 및 경계조건을 이용하여 해석이 가능하게 된다(Amein, 1968). 유량차분기법은 양해법과

음해법으로 해석할 수 있다. 양해법에서 임의의 시간에 대한 해석은 단지 이전시간에 대한 값에 의존하는 반면, 음해법에서는 이전 및 현재의 시간에 대한 값으로

구해진다. 많은 음해기법이 시간 및 공간 미분항을 근사화하기 위해서 개발되었다.

본 연구에서는 쌍곡선형, 비선형, 편미분계 함수인 St. Venant 방정식을 비선형 대수방정식의 형태로 변환하기 위해 가중 4점 음해 유한차분 근사해법을 이용하였다 (Fread, 1988). 시·공간 좌표상에서 가중 4점 음해 유한차분 근사해법에 의한 차분화된 연속 및 운동량방정식은 다음 Eqs. (3) and (4)와 같다.

$$\left[\frac{(s(A+A_o))_{i+1}^{j+1} + (s(A+A_o))_{i+1}^{j+1} - (s(A+A_o))_i^j - (s(A+A_o))_{i+1}^j}{2\Delta t_j} \right] + \theta \left[\frac{Q_{i+1}^{j+1} - Q_i^{j+1}}{\Delta x_i} \right] + (1-\theta) \left[\frac{Q_{i+1}^j - Q_i^j}{\Delta x_i} \right] = 0 \quad (3)$$

$$\left[\frac{(sQ)_{i+1}^{j+1} + (sQ)_{i+1}^{j+1} - (sQ)_i^j - (sQ)_{i+1}^j}{2\Delta t_j} \right] + \theta \left[\frac{(\beta Q^2/A)_{i+1}^{j+1} - (\beta Q^2/A)_i^j}{\Delta x_i} \right] + (1-\theta) \left[\frac{(\beta Q^2/A)_{i+1}^j - (\beta Q^2/A)_i^j}{\Delta x_i} \right] + \theta \left[gA^{j+1} \left\{ \frac{H_{i+1}^{j+1} - H_i^{j+1}}{\Delta x_i} + \bar{S}_f^{j+1} + \bar{S}_e^{j+1} \right\} \right] + (1-\theta) \left[gA^j \left\{ \frac{H_{i+1}^j - H_i^j}{\Delta x_i} + \bar{S}_f^j + \bar{S}_e^j \right\} \right] = 0 \quad (4)$$

여기서, $\bar{A} = \frac{A_i + A_{i+1}}{2}$ 이며, $\bar{S}_f = \left[\frac{n_i^2 \bar{Q} \bar{Q}}{\mu^2 A^2 R^{4/3}} \right]$, $\bar{R} = \frac{\bar{A}}{B}$,

$\bar{B} = \frac{B_i + B_{i+1}}{2}$ 이다.

동적수리해석의 안정성과 정확성을 얻기 위해 확산과 운동방정식 기법을 이용하여 LPI 기법을 개발하였으며 (Fread *et al.*, 1996), 수치 필터 (σ)를 이용하여 운동방정식에서 관성항의 기여도를 확장시켰다. 수정된 방정식과 수치 필터의 범위는 다음과 같다.

$$\sigma \left[\frac{\partial (sQ)}{\partial t} + \frac{\partial (\beta Q^2/A)}{\partial x} \right] + gA \left[\frac{\partial H}{\partial x} + S_f + S_e + S_b \right] + L + W_f B = 0 \quad (5)$$

$$\sigma = \begin{cases} 1.0 - F_r^m & (F_r \leq 1.0; m \geq 1) \\ 0 & (F_r > 1.0) \end{cases} \quad (6)$$

여기서, S_b 는 비뉴턴 유체의 내부적 점성손실에 의한 마찰을 나타내며, W_f 는 바람의 영향을 나타낸다. 지수 m 은 사용자 지정상수로 일반적으로 $3 \leq m \leq 5$ 의 범위를 가진다.

2.2 DyQUAL 동적수리해석 모형의 지배 방정식

본 연구에 사용된 동적수리해석 모형인 DyQUAL 모형은 기존의 CE-QUAL-RIV1Q 모형에 자연하도단면의 Saint-Venant 수리해석 결과의 import 기능, 자생적 BOD 계산기능을 추가했다. 오염물질의 질량보존방정식은 흐름방정식을 구하는 것과 같은 방법을 사용하여 Eq. (7)로 부터 구할 수 있다.

$$\frac{\partial (A\alpha)}{\partial t} + \frac{\partial (UA\alpha)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(DA \frac{\partial \alpha}{\partial x} \right) + q\gamma + S^* \quad (7)$$

여기서, α 는 오염물질의 농도를 나타내며, S^* 는 용출소멸량을 나타내고, D 는 확산계수를 나타내며, γ 는 측방향 유입수의 농도를 나타낸다.

모형 내에서 BOD를 계산하는 지배방정식은 자생 BOD를 고려할 수 있도록 다음과 같이 구성하였다.

$$\frac{dL}{dt} = -(k_d + k_{dN} + k_{SL} + \frac{k_{BL}}{H})L + (1 - \gamma_a) a_{oad} \rho C_a \quad (8)$$

여기서, L 은 CBOD의 농도이며, k_d 는 탈산소계수를 나타내고, k_{dN} 은 질산염감소와 혐기성 CBOD 산화를 위한 반응계수를 나타낸다. 또한 k_{SL} 은 CBOD의 침전을 나타내며, k_{BL} 은 CBOD의 하상용출 및 흡착을 나타낸다. γ_a 는 조류의 호흡율의 비를 나타내며, a_{oad} 는 단위조류 분해에 필요한 산소비를 나타낸다. ρ 는 조류의 사멸률을 나타내며, C_a 는 조류의 농도이다.

Eq. (8)에서 생성항은 조류와 수생식물의 사멸로부터의 CBOD 기여분이며 소멸항은 CBOD의 산화, 탈질, 침전, 하상용출흡착을 포함한다. 탈산소계수 k_d 와 탈질 반응계수 k_{dN} 는 난류정도, 순환하는 물의 온도, 국지적 DO, 국지적 질소농도의 함수로 추정되었다. 탈산소계수 k_d 는 모노드 방정식에 의해 DO에 따라 증가되며 탈질 반응계수 k_{dN} 는 유사한 공식에 의해 DO에 따라 감소된다고 가정된다. 또한 탈질반응계수 k_{dN} 는 탈산소계수 k_d 가 산소에 의존하는 것과 같은 방식으로 질산염에 의존한다고 가정한다.

DO는 재포기와 광합성에 의해서 발생되며 CBOD의 산소소모, 질산화, 식물호흡과 광합성에 의해 소멸되며 기본방정식은 다음 Eq. (9)와 같이 구성되었다.

$$\frac{dO}{dt} = k_a(O_s - O) - k_d L - \frac{k_{SOD}}{H} - k_{N23} a_{on2} N_2 - k_{N34} a_{on3} N_3 + a_{omp} \mu C_a - \gamma_a a_{oad} \rho C_a \quad (9)$$

여기서, O 는 용존산소의 농도이며, O_s 는 용존산소의 포화농도를 나타낸다. k_a 는 재포기계수를 나타내며, k_{SOD} 는 하상산소요구량을 나타낸다. k_{N23} 는 암모니아성 질소에서 아질산성 질소로의 질산화계수를 나타내며, a_{on2} 는 암모니아성 질소의 산화에 사용되는 산소비를 나타내고, N_2 는 암모니아성 질소의 농도를 나타낸다. k_{N34} 는 아질산성 질소에서 질산성 질소로의 질산화계수를 나타내며, a_{on3} 는 아질산성 질소의 산화에 사

용되는 산소비를 나타내고, N_3 는 아질산성 질소의 농도를 나타낸다. a_{oap} 는 조류의 광합성에 의한 산소의 생성비를 나타내며, μ 는 조류의 성장률을 나타낸다.

유기질소는 조류의 사멸로부터 생성되고 무기화와 침전, 하상용출흡착에 의해 소멸되며 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$\frac{dN_1}{dt} = -\left(k_h + k_{lN} + k_{SN1} + \frac{k_{BN}}{H}\right)N_1 + a_{na}\rho C_a \quad (10)$$

여기서, N_1 은 유기질소의 농도를 나타내며, k_h 는 가수분해율을 나타낸다. k_{SN1} 은 유기질소의 침전율을 나타내며, k_{BN} 은 질소의 하상용출 및 흡착율을 나타내고, a_{na} 는 조류 내 질소 함량비를 나타낸다.

암모니아성 질소는 조류의 사멸에 따라 발생한 유기질소의 가수분해에 의해 증가하며 암모니아의 질산염으로의 변환, 조류의 섭취, 그리고 침전, 하상용출에 의해 감소하며 다음 Eq. (11)과 같이 구성된다.

$$\frac{dN_2}{dt} = k_h N_1 - \left(k_{N23} + k_{SN2} + \frac{k_{BN}}{H}\right)N_2 - a_{na}F\mu C_a \quad (11)$$

여기서, k_{SN2} 는 암모니아성 질소의 침전율을 나타내며, F 는 조류성장에 사용되는 질소 중 암모니아성 질소의 함량비를 나타낸다.

질산염은 질산화에 의해 생성되고 식물섭취와 탈질화에 의해 제거되며, 아질산성 질소와 질산성 질소의 반응식은 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$\frac{dN_3}{dt} = k_{N23}N_2 - k_{N34}N_3 \quad (12)$$

$$\frac{dN_4}{dt} = k_{N34}N_3 - a_{na}(1-F)\mu C_a - (k_{lN} + k_{NSed})N_4 \quad (13)$$

여기서, N_4 는 질산성 질소의 농도를 나타내며, k_{NSed} 는 하상탈질반응계수를 나타낸다.

유기인은 조류사멸에 의해 생성되고 가수분해와 침전에 의해 소멸된다. 유기인의 가수분해는 용존인의 생성원이며 소멸원은 유사에 의한 흡착과 인의 식물섭취로 구성되며 다음과 같이 유기인과 용존인의 반응식을 구성할 수 있다.

$$\frac{dP_1}{dt} = a_{pa}\rho C_a - (k_{p12} + k_{sp1})P_1 \quad (14)$$

$$\frac{dP_2}{dt} = k_{p12}P_1 - (k_{BP}P_2 + a_{pa}\mu C_a) \quad (15)$$

여기서, P_1 은 유기인의 농도를 나타내며, P_2 는 용존인의 농도를 나타내고, a_{pa} 는 조류 내 인의 함량비를 나타낸다. k_{p12} 는 유기인의 가수분해율을 나타내며, k_{sp1} 은 유기인의 침전율을 나타내고, k_{BP} 는 인의 하상용출 및 흡착을 나타낸다.

3. 균일하도에 대한 적용

본 연구에서 개발된 DyHYD, DyQUAL모형의 적용성을 검토하기 위하여 균일하도에서 임의의 시간간격 τ 동안에 유입된 오염물의 영향에 대하여 수치실험을 실시하였다. Eq. (16)은 이 경우에 대한 해석해를 나타내고 있다.

$$C(x,t) = \frac{C_0}{2} \exp\left(\frac{-kx}{U}\right) \left[\operatorname{erf} \frac{x - U(t-\tau)(1-\nu)}{\sqrt{4E_x t}} - \operatorname{erf} \frac{x - U(1+\nu)}{\sqrt{4E_x t}} \right] \quad (16)$$

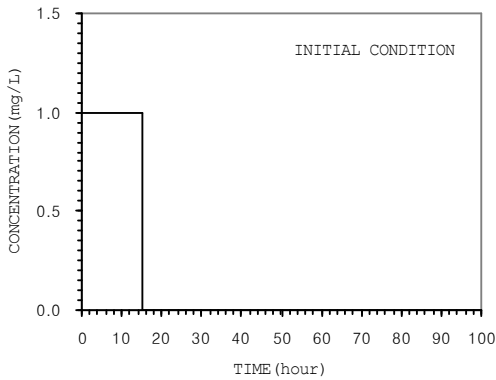
$$\text{여기서, } \nu = \frac{kE_x}{U^2}, \operatorname{erf}(p) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^p e^{-\eta^2} d\eta \text{이다.}$$

하도의 선정은 50 km 구간에 대하여 하폭 200 m의 직사각형 수로를 구성하고 조도계수 $n = 0.03z$, 수로경사 0.0002로 설정하였다. 확산계수는 McQuivey & Keefe (1974)의 식을 사용하였는데 식 (17)은 18개의 하도에 대하여 40회의 현장실험을 실시하여 유량은 35 cfs에서 33,000 cfs까지의 범위와 하상경사는 0.00015에서 0.0098 사이의 범위에서 광범위하게 적용하도록 제안된 식이다 (Singh *et al.*, 1987).

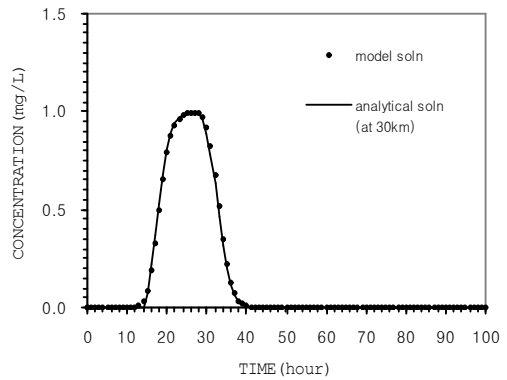
$$E_x = 1.8 \times 10^{-4} \frac{Q}{S_0 B} \quad (17)$$

여기서, E_x 는 확산계수 (m^2/day)이고, Q 는 유량으로 cfs 단위를 적용한다. S_0 는 하상경사를 나타내고 B 는 평균하폭으로 ft 단위를 사용한다.

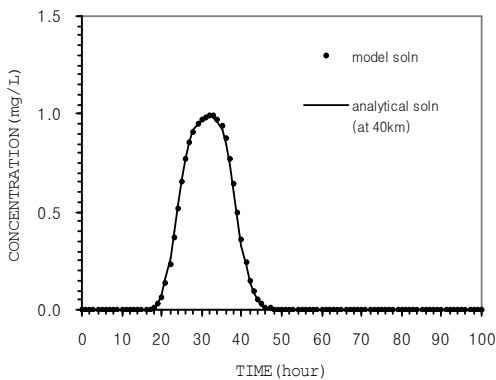
Fig. 3 (a)에서와 같이 총 100시간의 모의동안 오염물이 초기 15시간동안에 1ppm의 농도로 급격히 하도구간내에 유입된 경우에 대하여 모의하였다. 그림 Figs. 3 (b)~(d)는 각각 30, 40, 48 km에서의 모형의 해석결과로 보는 바와 같이 각 지점별 농도의 변화가 해석해와 잘 일치됨을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구모형은 하천으로 유입된 각종 오염물의 유동해석에 적용성이 있는 것으로 판단된다.



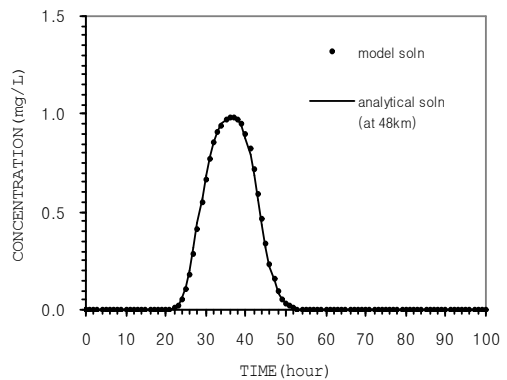
(a) Initial Conditions of Upstream Boundary



(b) Changes in Downstream Concentrations (30 km)



(c) Changes in Downstream Concentrations (40 km)



(d) Changes in Downstream Concentrations (48 km)

Fig. 3. Initial Conditions of Upstream Boundary and Changes in Downstream Concentrations

4. 낙동강 유역에 적용

개발된 동적수리·수질해석모형의 적용성을 검토하기 위하여 2008년 1월에서 3월 낙동강의 유량 및 수질농도 자료를 이용하여 모형의 매개변수를 보정하였으며, 2008년 3월에서 7월 낙동강의 자료를 이용하여 모형을 검증하기 위하여 모형의 결과값과 국립환경과학원(2009)의 8일 실측치를 비교 분석하였다.

4.1 모형의 보정

개발된 동적수질해석 모형의 실제 하천에 대한 적용성을 검토하기 위하여 낙동강 유역에 적용을 하였다. 대상기간은 2008년 1월 9일부터 3월 12일까지 총 64일에 대해서 낙본 C(경북 안동시 풍천면 신성리)에서 낙본 D(경북 구미시 옥성면 구봉리 낙단대교)구간에 이르는 54 km 구간에서 모의를 실시하였다. 모의 수행결과와의 비교는 실측자료가 있는 유량, BOD, TN, TP에

대해서 관측자료와 모의결과의 비교를 실시하며 매개변수를 보정하였다. 보정에 사용된 매개변수는 민감도가 비교적 높은 노드계수 위주로 수정을 하였으며, BOD의 경우에는 CBOD의 침전율에 관여하는 CBODSR을 0.05~0.20의 범위에서 사용하였으며, 탈산소계수 AKI를 0.02~0.03 범위에서 사용하였다. TN의 경우에는 질산화계수인 AKN을 0.1~0.3의 범위에서 사용하고, TP의 경우 인의 가수분해율 매개변수인 KPDK를 0.30~0.35의 범위로 사용하였다.

낙본 C의 8일 실측자료를 spline 보간법을 이용하여 일자료로 변환하여 상류단 경계조건으로 하였으며, 하류단 경계조건으로는 낙동수위표의 수위자료를 사용하였다. Fig. 4의 모식도에 나타난 것처럼 지류는 내성천, 영강, 병성천, 위천을 사용하였으며, 상류단 경계조건과 같은 방식인 spline 보간법을 이용하여 일자료로 변환한 후 입력하였다.

Fig. 5는 동적수리해석과 수질해석의 보정 결과로 수

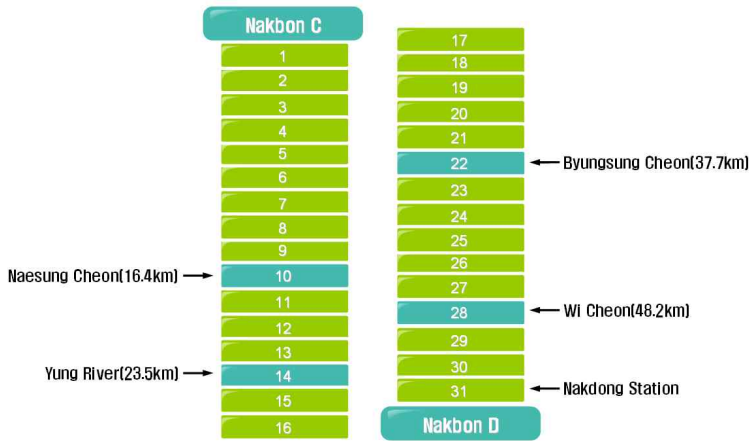


Fig. 4. Computation Element for Model Application

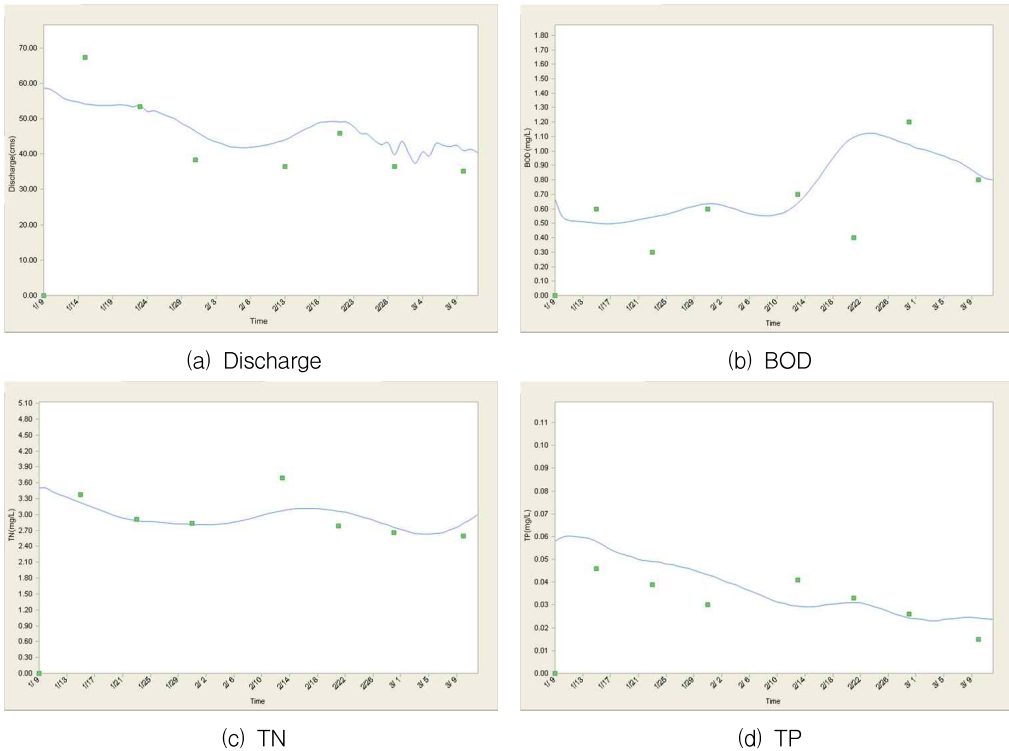


Fig. 5. Calibration Results of DyHYD, DyQUAL

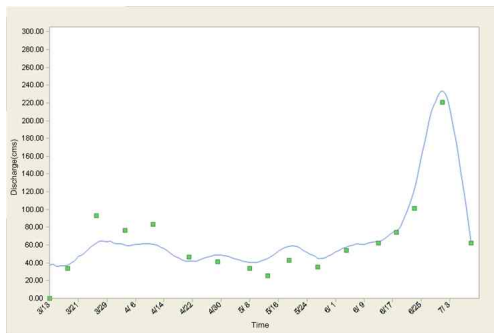
리모의 결과로는 유량을 나타내었으며, 수질해석의 결과로는 BOD, TN, TP의 결과를 각각의 관측치와 비교하여 도시하였다.

유량의 경우 전반적인 경향은 실측자료와 유사하게 나타나고 있으나, 2월 말에서 3월 초에 진동을 나타내고 있는데 진동에 대한 원인의 파악이 필요할 것으로

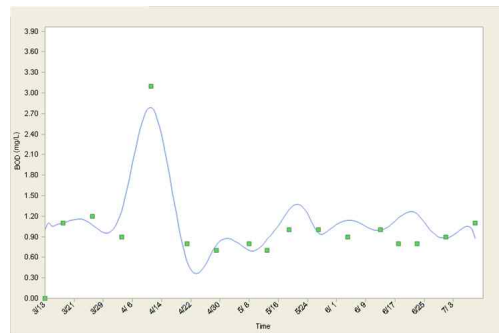
판단된다. BOD의 경우 모의결과가 실측치와 유사한 경향을 나타내고 있으나, 실측치가 1월 23과 2월 21일에 각각 0.2와 0.4 mg/L로 낮은 농도를 나타내고 있으나 모의 결과는 이를 반영하지 못해 매개변수에 추가적인 조정이 필요할 것으로 판단된다. TN의 경우 2월 13일의 실측자료가 3.696 mg/L였으나, 모의결과는 이보다

Table 1. Relative Coefficients for Each Calibration Data

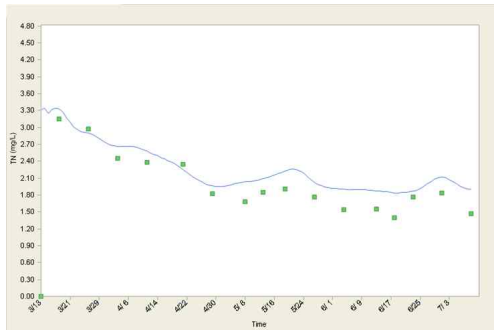
Calibration Results Relative Coefficients	Discharge	BOD	TN	TP
Nash-Sutcliffe Coefficients	0.591	0.391	0.441	0.376
Relative Coefficients (R)	0.893	0.703	0.738	0.854



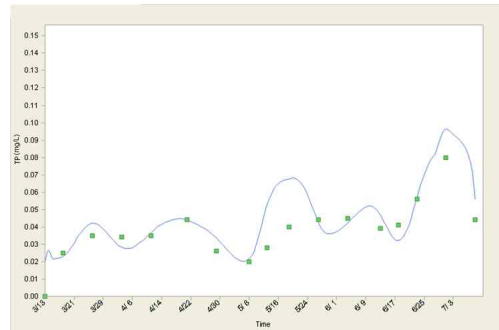
(a) Discharge



(b) BOD



(c) TN



(d) TP

Fig. 6. Verification Results of DyHYD, DyQUAL

낮아 실측치를 반영하지 못하였지만 나머지 실측자료와는 유사한 결과를 나타내었다. TP의 경우에는 모의 초기에는 관측치보다 계산결과가 높게 나타나는 경향이 있어 BOD와 마찬가지로 매개변수의 조정이 필요할 것으로 판단된다.

모의의 정확성을 정량적으로 파악하기 위해 Table 1과 같이 모형의 결과와 실측 관측치의 비교를 통하여 Nash-Sutcliffe 계수와 상관계수를 제시하였다. Nash-Sutcliffe 계수가 0.75 이상일 때는 모의가 비교적 정확하게 수행되어졌다고 하고 0.75와 0.36 사이의 값일 때 모의 결과는 보완하여야 하는 것으로 언급된다(Motovilov

et al., 1999). 본 동적수리·수질해석 모형의 보정과정에서 계산된 Nash-Sutcliffe 계수는 0.376에서 0.591의 범위를 나타내어 전반적으로 매개변수의 보완이 필요할 것으로 판단된다. 상관계수는 0.703에서 0.893의 범위를 나타내어 BOD의 경우에 낮은 실측자료를 반영하지 못하여 Nash-Sutcliffe 계수와 상관계수 모두 상대적으로 낮은 값을 나타내는 것을 알 수 있다.

4.2 모형의 검증

모형의 보정과정에서 설정된 매개변수를 이용하여 동일구간에서 2008년 3월 13일에서 7월 8일까지 119일

간의 검증을 수행하였다.

Fig. 6에서 보는 바와 같이 유량의 경우에는 모의치와 실측치의 경향과 침투유량이 유사하게 나타난다. 4월에는 모의치가 실측치보다 낮게 나타나나 저유량과 침투유량을 나타내는 7월의 경우에는 실측 유량값과 유사한 유량으로 모의되었음을 알 수 있다. 동적수질해석의 결과 중 BOD의 경우에는 침투농도와 실측치의 전반적인 경향은 관측값과 유사한 패턴을 나타내고 있다. TN의 경우에는 5월까지 모의 결과가 실측자료와 잘 일치하고 있으나, 5월 이후에는 모의 결과가 실측자료보다 0.05~0.045 mg/L정도 높게 나타나고 있어 관련된 매개변수의 섬세한 조정이 필요할 것으로 판단된다. TP의 경우에는 모의 기간 전반적으로 실측치와 모의결과가 유사한 경향을 보

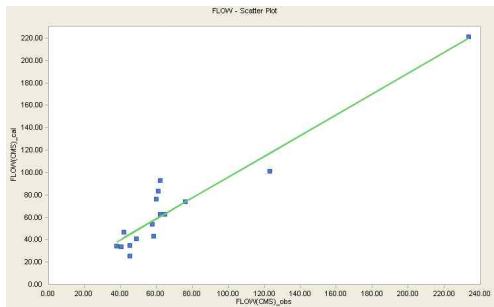
이나 5월과 7월의 경우 모의 결과가 실측자료보다 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

보정과정과 마찬가지로 검증결과를 Nash-Sutcliffe 계수와 상관계수를 통하여 정량화 하였다. 유량과 BOD, TN, TP의 Nash-Sutcliffe 계수는 각각 0.902, 0.812, 0.704, 0.781로 보정결과보다 높게 나타났으며 앞서 설명한바와 같이 TN을 제외하고 0.75 이상의 값을 나타내어 모의가 전반적으로 정확하게 수행된 것으로 판단된다. Fig. 7에 나타낸 것과 같이 유량과 BOD, TN, TP의 상관계수는 각각 0.954, 0.907, 0.966, 0.828로 높게 나와 모의 결과와 관측자료가 강한 선형관계를 나타내고 있다.

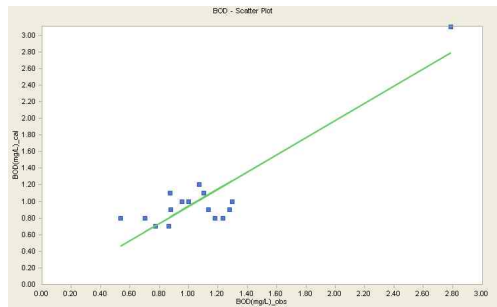
가상하도에 대한 모형의 적용결과와 실제유역에 대한 모형 검토과정의 결과가 해석해와 관측자료와 비

Table 2. Relative Coefficients for Each Verification Data

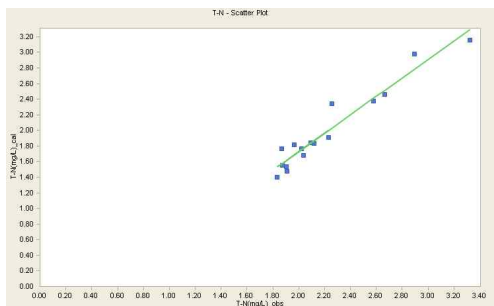
Verification results Relative coefficients	Discharge	BOD	TN	TP
Nash-Sutcliffe coefficients	0.902	0.812	0.704	0.781
Relative coefficients (R)	0.954	0.907	0.966	0.828



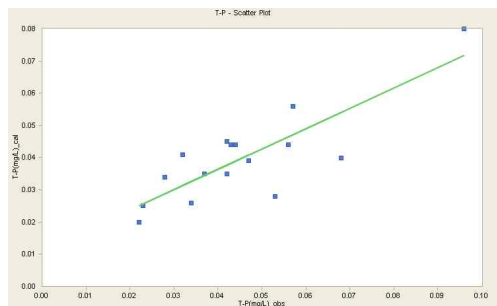
(a) Discharge



(b) BOD



(c) TN



(d) TP

Fig. 7. Scatter Diagram for Verification Results

교적 잘 일치하는 것을 알 수 있었다. 이를 통해 본 연구에서 개발된 동적수리해석 모형과 동적수질해석 모형이 안정적으로 구현되는 것을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 실제 하천의 불규칙한 단면을 반영하고, 갈수량과 저유량을 포함한 다양한 흐름조건에서 발산하지 않으며, 자생 BOD를 포함한 여러 수질농도를 안정적으로 계산할 수 있는 동적수질해석모형을 개발하였다. 연구결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. 실제 하천에서 발생하는 다양한 흐름조건을 안정적으로 계산할 수 있는 동적수리모형과 수질모형을 개발하였고, 모형의 GUI를 구성하여 pre/post-process를 강화였으며, 관측자료가 존재하는 자료들에 대해서는 산점도와 상관계수, Nash-Sutcliffe 계수를 제시하여 수행된 모의에 대한 정확도와 신뢰도를 평가할 수 있다.
2. 본 연구에서 개발된 동적수리해석모형과 동적수질해석모형의 적용성을 검토하기 위하여 가상 균일 하도에 적용하였으며, 하류 각 지점별 농도의 변화가 해석해와 잘 일치됨을 확인할 수 있어 개발된 모형이 하천으로 유입되는 각종 오염물의 유동 해석에 적용성이 있는 것으로 판단된다.
3. 실제 하천에서 안정적인 모의수행에 확인하기 위하여 낙동강 유역에 모형을 적용하였다. 검증과정의 결과는 유량, BOD, TN, TP를 실측자료와 비교하였을 때 전반적으로 잘 일치함을 알 수 있었고, Nash-Sutcliffe 계수는 0.704에서 0.902의 범위를 나타내었으며, 상관계수는 0.828에서 0.966의 범위를 나타내어 모의가 전반적으로 잘 수행되었음을 확인할 수 있었다.
4. 향후 다양한 수질모의를 통하여 수질 매개변수의 적정 적용범위를 규정하여 더욱 정확한 모의가 수행될 수 있을 것으로 사료되며, 본 연구에서 구축된 동적수리해석모형과 수질해석모형이 낙동강 유역에 대해 유량 및 수질 등의 실제 하천의 경향을 비교적 정확하게 재현하는 것으로 판단되어 오염물 총량규제에 따른 합리적인 하천 수질관리대책을 수립하는데 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2009년 낙동강 수계관리위원회환경기초사업의 “낙동강 수계 특성을 고려한 오염총량 지원 모델 시스템 구축”에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 국립환경과학원 (2009). **수질오염총량관리를 위한 '08 낙동강수계 목표수질측정망 운영결과 보고서**. pp. 178-187.
- 고익환, 노준우, 김영도 (2005). “정상 및 비정상상태 하천수질모형의 비교”. **한국수자원학회 논문집**, 제38권, 제6호, pp. 505-515.
- 노준우, 이상욱, 정세웅 (2008). “유역통합수자원관리를 위한 하천수질 예측시스템의 개발 및 적용”. **한국수자원학회지**, 제41권, 제1호, pp. 33-38.
- 노준우, 이상욱, 정성태 (2008). “동적하천수질모형을 활용한 증가방류 모의”. **한국수자원학회지**, 제41권, 제10호, pp. 48-51.
- 정세웅 (2004). “저수지 플러싱 방류 효과분석을 위한 비정상상태 하천수질모형의 적용”. **한국수자원학회 논문집**, 제37권, 제10호, pp. 857-868.
- Amein, M. (1968). “An implicit method for numerical flood routing”. *Water Resources Research*, Vol. 4, No. 8, pp. 719-726.
- Delong, L.L. (1986). *Extension of the unsteady one-dimensional open-channel flow equations for the flow simulation in meandering channels with flood plains*. Hydrologic Sciences, United States Geological Survey Water-Supply, Paper 2220, December, pp. 101-105.
- Environmental Laboratory, U.S. Army Corps of Engineers, WES. (1995). CE-QUAL-RIV1: A Dynamic, One-Dimensional (Longitudinal) Water Quality Model for Steams. *User's Manual*. USACE, WES, Vicksburg, MS, USA.
- Fread, D.L. (1988). *The NWS DAMBRK model: theoretical background/user documentation*. Office of Hydrology, National Weather Service NWS, Md.
- Fread, D.L., Jin, M., and Lewis, J.M. (1996). “An LPI Numerical Implicit Solution for Unsteady Mixed-Flow Simulation”. *North American Water and Environment Congress '96*, ASCE, Anaheim, CA, USA.
- McQuivey, R.S., and Keefer, T.N. (1974). “Simple method for predicting dispersion in streams”. *J Environ Eng Div, ASCE* 100 (EE4), pp. 997-1011.
- Motovilov, Y. G., Gottschalk, L., Engeland, K., and Rohde, A. (1999). “Validation of a distributed hydrological model against spatial observations”. *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 98, pp.

257-277.

Parker, G.T., Droste, R.L., and Kennedy, K.J. (2007). "Modeling the Effect of Agricultural Best management Practices on Water Quality Under Various Climatic Scenarios". *Journal of Environmental Engineering and Science*, Vol. 7, pp. 9-19.

Rochelle, A. Nustad, and Jerad, D.B. (2006). *Simulation of Constituent Transport in the Red River of the North Basin, North Dakota and Minnesota, During Unsteady-Flow Conditions, 1977 and 2003-04*. Scientific Investigations Report 2006-5296, USGS,

pp. 1-5.

Singh, U.P., Ranga Raju, K.G., and Garde, R.J. (1987). "Longitudinal dispersion coefficient in open channels". Proc. of IAHR 22th Congress, pp. 251-257.

Zhang, M.L., Shen, Y.M., and Guo, Y. (2008). "Development and Application of A Eutrophication Water Quality Model for River Networks". *Journal of Hydrodynamics*, Vol. 20, No. 6, pp. 719-726.

논문번호: 10-003	접수: 2010.01.12
수정일자: 2010.02.11	심사완료: 2010.02.19