

2·3차원 준연계 모형을 이용한 남강댐 하류부 흐름 및 BOD 수송 해석 Analysis of Flow and BOD Transport at the Downstream of Nam River Dam Using 2-D and 3-D Semi-coupled Models

김 지 훈* / 송 창 근** / 김 영 도*** / 서 일 원****

Kim, Ji Hoon / Song, Chang Geun / Kim, Young Do / Seo, Il Won

Abstract

The downstream of the Nam River Dam is crucial region for long-term water resource planning for Busan and Gyeongnam Province. Thus, the analysis of flow behavior and water quality is necessary for the sustainable surface water management and the control of pollutant source. In this study, the flow field and BOD transport at the downstream of Nam River Dam were analyzed by incorporating 2-D water quality model, RAM4 and 3-D water quality model, WASP with the hydrodynamic model, RAM2 and EFDC, respectively. The application of 2-D flow analysis model, RAM2 showed that velocity distributions at the five transverse sections of the meandering part closely followed the measured values by ADCP, and the flow field and overflow characteristic at the submerged weir showed satisfactory performance compared with the result of 3-D EFDC model. In addition, the BOD concentration field obtained by RAM2-RAM4 coupled modeling was in good agreement with the result by EFDC-WASP model throughout the computational domain. The hydrodynamic characteristic and water quality at the downstream reach of Nam River Dam are mainly influenced by the Dam discharge, and the water quantity is closely related to the water quality control and fishery environment at the lower part of Nakdong River. Therefore, when further quantitative analysis is necessary regarding these issues, 2-D semi-coupled modeling is recommended in terms of computational effectiveness and model application aspect.

Keywords : Nam river, RAM2-RAM4, EFDC-WASP, ADCP

요 지

남강댐 하류는 부산·경남의 수자원 장기 계획에 중요한 지역이므로 지속가능한 지표수 관리 및 오염원 제어를 위해 흐름 및 수질 해석이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 2차원 수질모형인 RAM4와 3차원 수질모형인 WASP를 각각 수리모형인 RAM2 및 EFDC모형과 연계하여 2·3차원 준연계 모형을 이용한 남강댐 하류에서의 수리 및 수질을 해석하였다. 2차원 흐름해석 모형인 RAM2 적용 결과 만곡부 5개 횡단 측선에서의 유속의 증감경향이 ADCP 실측값과 잘 일치하였으며, 3차원 모형인 EFDC와 유속 분포 및 보 월류 유속이 유사하였다. 또한 정상상태 도달 후의 RAM2-RAM4 연계모의에 의한 BOD 농도와 EFDC-WASP 연계모의에 의한 BOD 농도장이 모의영역 전반에 걸쳐 유사하게 나타났다. 남강댐 하류부의 경우 수리 및 수질이 남강댐 방류량에 크게 좌우되며 남강댐의 수량은 하류부의 수질 및 연안 어업환경에 큰 영향을

* 한국수자원공사 K-water연구원 연구원 (e-mail: jhkim83@ymail.com)

Researcher, Korea Institute of Water and Environment, K-water, Daejeon 305-730, Korea

** 서울대학교 건설환경공학부 박사후연구원

Post-doctoral researcher, Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University, Seoul 151-744, Korea

*** 교신저자, 인제대학교 환경공학부(낙동강유역환경연구센터) 조교수 (e-mail: ydkim@inje.ac.kr)

Corresponding Author, Assistant Prof., Department of Environmental Science and Engineering, Inje University, Gyeongnam 621-749, Korea

**** 서울대학교 건설환경공학부 교수

Prof., Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University, Seoul 151-744, Korea

미치므로 향후 이에 대한 정량적 분석 시 계산의 효율성 및 모형의 적용성 측면에서 2차원 준연계 모형을 적용하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

핵심용어 : 남강, RAM2-RAM4, EFDC-WASP, ADCP

1. 서 론

남강은 진주시를 가로지르는 낙동강의 제1지천으로 남강댐, 남강수중보, 교량 등의 인공구조물과 만곡흐름을 특징으로 하는 하천으로서 하상경사가 매우 완만하고 유속이 비교적 느리므로 체류시간이 길어서 하천수질이 남강댐 방류량에 큰 영향을 받는다. 남강댐 하류구간의 합리적인 수질관리를 위해서는 수치모형을 이용한 남강댐 방류량 변화에 따른 동수역학적 수리해석 및 지천으로부터 유입되는 오염물질에 대한 이송확산 과정의 해석이 필요하다(경남발전연구원, 2010).

국내하천에서의 수질해석은 과거 QUAL 계열의 1차원 분석 위주에서 최근 2차원이나 3차원 모형에 의한 해석이 주를 이루고 있다. 자연하천에서 2차원 오염물질 이송확산 해석에 가장 널리 사용되어 온 모형은 미연방 도로국(U.S. Federal Highway Administration)과 Brigham Young 대학의 Environmental Modeling Research Laboratory (EMRL)에서 Norton 등(1973)에 의해 개발된 RMA-4이다. 이 모형은 유한요소법이 수리학 분야에 적용되기 시작한 1970년대 초반에 개발된 모형으로 수치적으로 안정적인 결과를 도출하지만 최신 수치기법을 반영하지 못하고, 만곡부에서 오염원의 확산거동을 왜곡하므로 실제 자연하천에서의 적용성 측면에서 많은 제약이 있었다. 또한 모의 영역 내부 절점에 유입되는 오염원이나 수질사고에 의한 순간 질량주입에 의한 혼합거동을 해석할 수 없고, 수질모의 인자가 보존성 오염물질과 감쇠계수로 반응성이 조절되는 비보존성 오염물질의 해석에 국한되므로, BOD-DO 연계모의, 수온 모의, SS 모의 등에 있어서 많은 한계점을 가지고 있다. 따라서 이와 같은 제약점과 한계점을 극복하기 위해 순수 국내 기술로 개발되어 현재 상용화 앞둔 RAMS (River Analysis and Modeling System)를 이용한 연구가 최근 활발하게 진행된 바 있다. RAMS(서일원 등, 2010c)를 자연하천에 적용한 연구사례를 살펴보면 다음과 같다. 서일원과 송창근(2007)은 한강 본류구간에서 비보존성 오염물질의 확산거동에 대한 연구를 수행하였고, 서일원 등(2009b)은 팔당호 수계에서 발생할 수 있는 오염물질 유입사고에 따른 수질예측을 수행하였으

며, 서일원 등(2008)은 한강 감조구간에서의 비정상 흐름 조건에 따른 혼합거동에 대한 연구를 수행하였고, 서일원 등(2011a)은 일본의 Tone River에 RAMS 모형을 적용하고 항공사진 유속측정 결과와 비교검증을 수행하였으며, 서일원과 김성은(2010)은 낙동강 본류구간에 RAM2와 RAM4 모형을 적용하여 흐름해석과 부유사 거동모의를 수행한 바 있다. 최근에는 컴퓨터 계산속도의 향상에 의해 수심방향으로의 유속 및 농도분포를 계산할 수 있는 3차원 모형의 적용이 활발하게 이루어지고 있으며, 특히 동수역학모형인 EFDC와 3차원 수질모형인 WASP의 연계모의가 호소 및 하천영역에 이용되고 있다. EFDC와 WASP은 각각의 수리·수질모형을 가지고 있지만 WASP의 수리모형인 DYNHYD는 1차원적 흐름만 예측할 수 있어 3차원 적용이 어렵고, EFDC의 수질모형인 HEM-3D는 고려되는 수질변수가 대부분 국내 공공기관의 수질측정망에서 제공하고 있는 수질항목들이 아니기 때문에 입력자료와 보정자료 구축에 어려움이 있다. 따라서 두 모형의 약점을 보완하고자 국내의 수질모델링 관련 다수의 연구에서는 EFDC와 WASP을 연계모의하여 적용한 바 있으며, 호소에 적용한 사례로는 권기환 등(2008)의 대청호, 이용성 등(2008)의 광동댐, 김지원(2008)의 부항호, 정영원(2010)의 남강댐 등이 있으며, 서동일 등(2009)은 금강에서의 하천수질예측을 수행한 바 있다.

본 연구에서는 남강댐 직하류부터 남강수중보까지 총 8km 이르는 구간을 연구대상구간으로 선정하고 2차원 및 3차원 수치모형을 이용하여 자연하천에서의 수리 및 수질 해석을 실시하였다. 수치모의를 위한 입력자료 및 모의결과의 검증자료를 얻기 위해 ADCP를 이용한 유속측정과 시료채수에 의한 수질측정을 수행하였다. 이를 바탕으로 댐과 수중보에 의한 인공구조물과 지천유입구조, 만곡흐름 등을 특징으로 하는 중규모 도심구간의 하천에서 2·3차원 흐름 및 수질 모형의 적용성을 평가하였다.

2. 현장 실측

본 연구에서는 남강댐 하류부에서의 흐름특성과 지천으로부터 유입되는 오염물질의 혼합 거동을 해석하기 위

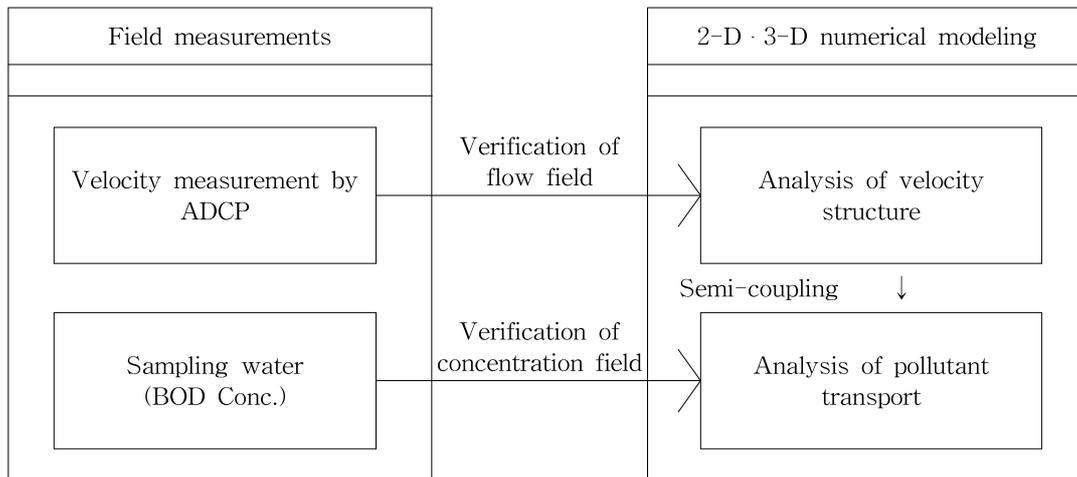


Fig. 1. Field Measurement and Numerical Modeling



(a) Study Area



(b) ADCP Measured Sections (Region A)

Fig. 2. Study Area and ADCP Measured Sections

해 Fig. 1과 같이 현장실측과 2·3차원 수치모델링을 수행하였다. 현장실측은 ADCP에 의한 남강 본류의 유속 및 유량측정과 본류 및 지류합류부에서의 수질분석을 위한 시료채수를 통해 수행되었으며, 수치해석을 위한 입력자료 및 모의결과의 검증자료로 사용되었다.

2.1 유속측정

본류 유속측정은 Fig. 2와 같이 남강댐 하류부에 위치한 천수교로부터 하류 방향 약 2km 구간의 5개 측선에서 ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)를 이용하여 이루어졌다. Fig. 3은 RDInstrument 사의 ADCP가 장착



Fig. 3. Discharge Measurement by ADCP

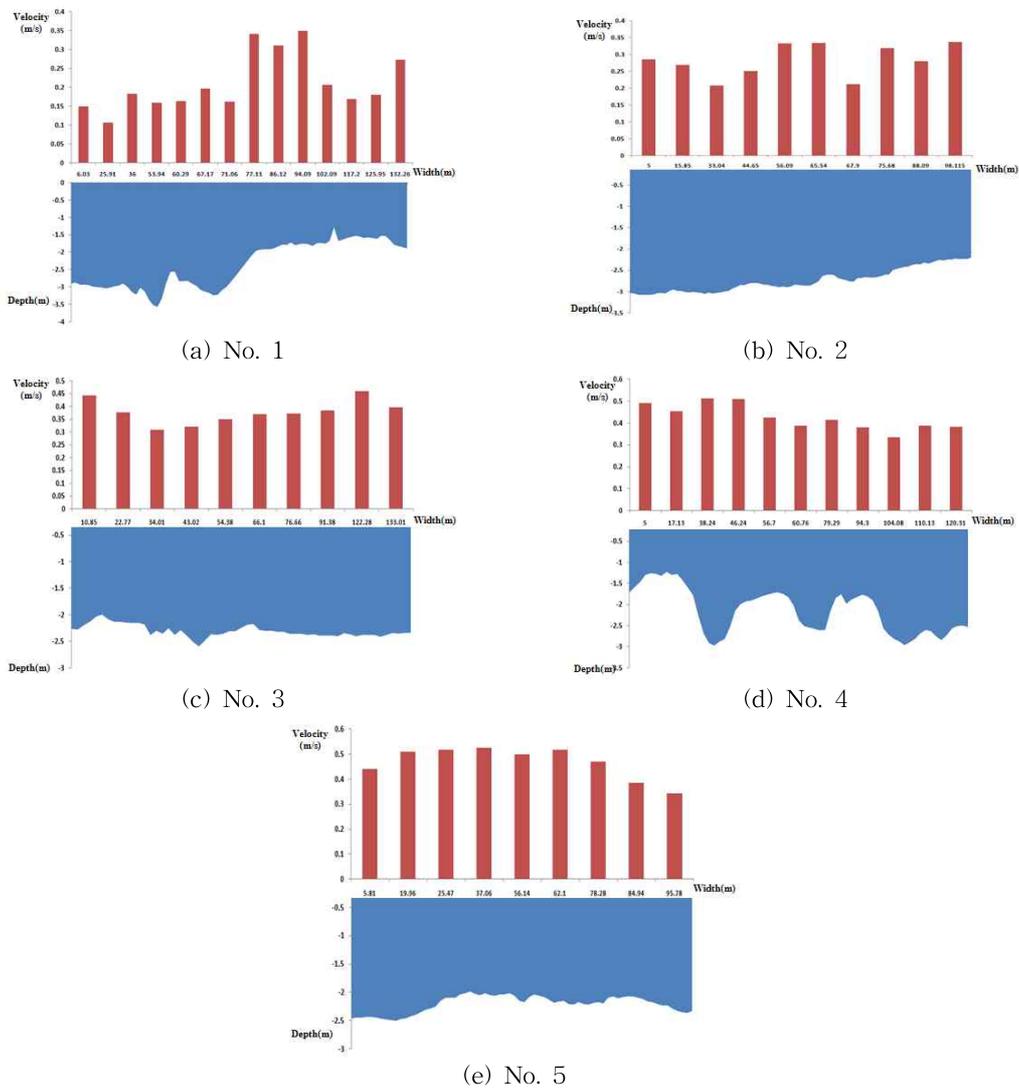


Fig. 4. Velocity Distributions by ADCP Measurement

된 Q-보트와 데이터 해석 프로그램인 WinRiver를 이용하여 유속을 실측하는 모습을 나타낸 것이다. Fig. 4는 5개의 측선에서 기록된 실측값을 나타낸 것으로 가로축은 좌

안으로부터 횡방향 거리, 세로축은 수심과 유속 측정 결과를 나타낸 것이다. 유속측정은 남강댐 방류량이 $136.1 \text{ m}^3/\text{s}$ 일 때 이루어졌으며, 측정구간의 평균 수심은 약 2.5m, 유

Table 1. Tributary Discharge

Tributary	Discharge (m ³ /s)
Doksan Stream	0.110
Panmun Stream	0.395
Nabul Stream	0.585

속은 0.1~0.7 m/s의 범위를 나타냈다. 또한 본류로 유입되는 독산천, 판문천, 나불천 등 3개의 지류에서 Valeport 사의 프로펠러 유속계를 사용하여 지류 유입량을 측정하였다. Table 1은 3개의 지천에서 측정된 유량 값을 나타낸 것이다.

2.2 수질측정

수질측정은 Fig. 5와 같이 본류 5개 측선과 3개의 지천에서 수행되었다. 수질의 2차원 분포를 얻기 위해 본류에서 한 측선 당 3개의 시료를 채수하였다. W1 지점은 교량에서 채수를 하였으며, 나머지 W2~W5 지점은 배로 횡단하며 채수를 실시하였다. 지류 수질측정은 유량측정과 마찬가지로 대상구간 내에 유입되는 판문천(W6), 독산천(W7), 나불천(W8)의 대표지점에서 시료를 채수하였다. 채수한 시료의 수질분석 항목은 BOD로 국한하고 수질공정 시험법에 의해 분석하였다. Table 2는 본류와 지류의 수질실험 결과를 나타낸 것이다. W1에서 평균 1.52 ppm의 농도를 나타내다가 독산천과 판문천으로부터 유입된 오염원에 의해 W2에서 평균 1.64 ppm으로 농도가 높아졌다. 이후 BOD 농도가 0.95 ppm으로 낮고 지류 유량은 0.585 m³/s로 비교적 높은 나불천의 유입, 오염물질의 이송확

Table 2. BOD Concentrations at Sampling Points

No.	BOD (mg/L)	Remark
W1-1	1.54	Namgang Dam Outlet
W1-2	1.50	
W1-3	1.53	
Average	1.52	
W2-1	1.71	Cheonsu Bridge
W2-2	1.61	
W2-3	1.60	
Average	1.64	
W3-1	1.61	Jinju Bridge
W3-2	1.50	
W3-3	1.55	
Average	1.55	
W4-1	1.40	In front of the bowl
W4-2	1.52	
W4-3	1.49	
Average	1.47	
W5-1	1.43	Jinyang Bridge
W5-2	1.38	
W5-3	1.35	
Average	1.39	
W6	6.40	Panmun Stream
W7	3.60	Doksan Stream
W8	0.95	Nabul Stream

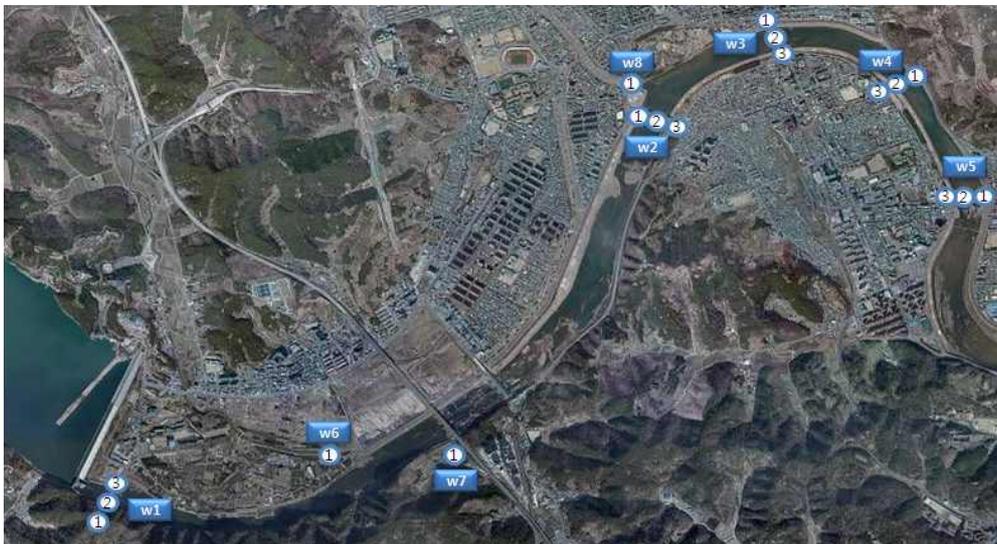


Fig. 5. Water Sampling Points

산에 의한 희석, 만곡부에서의 이차류에 의한 혼합 등의 영향으로 W3, W4, W5에서는 다시 농도가 낮아졌다.

3. 수치모형

본 연구에서는 남강댐 직하류부터 남강수중보까지 총 8km에 이르는 구간을 모의영역으로 선정하고 2차원 및 3차원 수치모형을 이용하여 자연하천에서의 수리 및 수질 해석을 수행하였다. 2차원 수질모형인 RAM4와 3차원 수질모형인 WASP은 각각 동수역학 모형인 RAM2 및 EFDC와 연계하여 모의가 진행된다. 수치모의에 이용된 모형을 소개하면 다음과 같다.

3.1 RAMS

RAMS(서일원 등, 2010c)는 2001년부터 시작된 21세기 프론티어 연구개발사업 중 수자원의 지속적인 확보기술개발사업의 세부과제인 ‘하천흐름 및 하상변동해석기술개발’, ‘RAMS 개발’, ‘RAMS 적용’의 연구를 통해 개발된 소프트웨어이다. RAMS는 복잡한 지형과 흐름 조건을 갖는 자연하천의 흐름, 오염물질의 이송·확산, 하상변동을 모의할 수 있는 SU/PG기법을 이용한 2차원 유한요소 수치해석 프로그램으로, 흐름해석 모형인 RAM2, 수질해석 모형인 RAM4, 하상변동해석 모형인 RAM6, 그래픽 사용자 환경의 전·후처리 모듈인 RAMS-GUI로 구성된다. 본 연구에서는 RAMS 모형 중 자연하천에서의 흐름 및 수질해석 모형인 RAM2와 RAM4를 남강댐 하류구간에 적용하였다.

RAM2는 RAMS의 하천흐름 해석모듈로서, 3차원 Navier-Stokes 방정식을 시간적분과 수직적분 한 후, 정수압 가정과 천수흐름 가정에 의해 유도된 보존형 2차원 천수방정식을 지배방정식으로 한다. Eq. (1)은 질량보존 방정식, Eq. (2)는 운동량보존방정식을 나타낸다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} + \frac{gh^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial z_0}{\partial x} + gn^2 \frac{p(p^2 + q^2)^{1/2}}{h^{7/3}} = 0 \quad (2a)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} + \frac{gh^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial z_0}{\partial y} + gn^2 \frac{q(p^2 + q^2)^{1/2}}{h^{7/3}} = 0 \quad (2b)$$

여기서, g 는 중력가속도, n 은 조도계수, p 와 q 는 각각 횡방향 유속에 수심 h 를 곱한 단위폭당 유량이며, z_0 는 바닥하상고를 의미한다. 삼각형 요소와 사각형 요소 및 혼합 요소와 2차 요소 등을 모두 포함하여 요소망을 구축할 수 있으며, SU/PG 기법을 이용한 유한요소모형을 통해 지배방정식을 이산화한다(최승용 등, 2009).

RAM4는 RAMS의 하천수질 해석모듈로서, 비압축성 유체에서 물질의 3차원 이송·확산 방정식을 수심 적분한 2차원 이송-분산 방정식을 지배방정식으로 사용하는 2차원 유한요소모형이다. 반응항과 생성·소멸항을 포함하는 RAM4의 지배방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(hC)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(huC) + \frac{\partial}{\partial y}(hvC) \\ & - \frac{\partial}{\partial x} \left[h \left(D_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial C}{\partial y} \right) \right] \\ & - \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(D_{yx} \frac{\partial C}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial C}{\partial y} \right) \right] - khC - Q = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, C 는 수심 적분된 농도이며, u 와 v 는 수직적분된 유속, k 는 반응성 오염물질의 감쇠계수, Q 는 생성 또는 소멸 함수이다. D_{xx} , D_{xy} , D_{yx} 및 D_{yy} 는 분산텐서로 다음과 같이 표현된다(이명은, 2007).

$$\begin{aligned} D_{xx} &= D_L \frac{u^2}{U^2} + D_T \frac{v^2}{U^2} \quad , \\ D_{xy} &= D_{yx} = (D_L - D_T) \frac{uv}{U^2} \quad , \\ D_{yy} &= D_T \frac{u^2}{U^2} + D_L \frac{v^2}{U^2} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, D_L 은 종분산계수, D_T 는 횡분산계수, U 는 합유속 벡터의 크기($\sqrt{u^2 + v^2}$)로 사용자에게 의해 입력된 값으로 정의된다. 분산텐서는 주흐름방향이 직교좌표계의 방향과 일치하지 않을 경우에 분산이 주흐름 방향을 따르도록 보정해 주는 역할을 하게 된다. RAM4의 반응항과 생성 또는 소멸항을 이용하는 경우, 순간 유입된 오염물질의 모의(이명은과 서일원, 2008), 비보존성 오염물질의 모의(서일원과 송창근, 2007), BOD-DO 연계 모의(서일원 등, 2010b), 수온 모의(서일원 등, 2011b), 부유사 모의(서일원 등, 2009a) 등을 수행할 수 있는 모형으로 확장이 가능하다.

3.2 EFDC

EFDC는 환경유체동역학코드(Environmental Fluid Dynamics Code)를 나타내는 약어로 버지니아 해양과학연

구소(VIMS)에서 1992년 처음 개발되었다(Hamrick, 1992). EFDC 모델은 유체의 이동, 염분 및 온도 모의 외에도 흡착성 또는 비흡착성 부유물질의 이동, 오염원 유입에 의한 희석, 부영양화 기작, 독성오염물질의 이동/반응 등의 모의가 가능하다. EFDC 모델에서는 수평방향의 경계조건을 나타내기 위하여 수평좌표계인 x, y 좌표를 고려하며 수직방향은 중력벡터를 이용하여 바닥지형과 움직임이 있는 수면을 표현한다. 즉, 시간에 따라 위치와 길이가 변화하므로 수직방향에 대한 변환이 필요하게 되며 그 변환식은 Eq. (5)와 같다.

$$Z = \frac{(Z^* + h)}{(\zeta + h)} \quad (5)$$

여기서, Z^* 는 원래의 물리적 좌표이며, h 와 ζ 는 각각 자유 수면과 바닥면에서의 물리적 좌표를 나타낸다.

EFDC 모델은 연속방정식과 운동방정식, 상태방정식, 물질 보존방정식 등으로 구성되어 있으며, 각각의 방정식은 Eqs. (6)~(14)와 같다.

$$\frac{\partial(m\zeta)}{\partial t} + \frac{\partial(m_y Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(m_x Hv)}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial(mHu)}{\partial t} + \frac{\partial(m_y Huu)}{\partial x} + \frac{\partial(m_x Hvu)}{\partial y} \quad (7)$$

$$- \left(mf + v \frac{\partial m_y}{\partial x} - u \frac{\partial m_x}{\partial y} \right) Hv = -m_y H \frac{\partial(g\zeta)}{\partial x} + Q_u$$

$$\frac{\partial(mHv)}{\partial t} + \frac{\partial(m_y Huv)}{\partial x} + \frac{\partial(m_x Hvv)}{\partial y} \quad (8)$$

$$+ \left(mf + v \frac{\partial m_y}{\partial x} - u \frac{\partial m_x}{\partial y} \right) Hu = -m_x H \frac{\partial(g\zeta)}{\partial y} + Q_v$$

$$\frac{\partial(mHv)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(m_y Huv) + \frac{\partial}{\partial y}(m_x Hvv) \quad (9)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial z}(mwv) + \left(mf + v \frac{\partial m_y}{\partial x} - u \frac{\partial m_x}{\partial y} \right) Hu = -m_x H \frac{\partial}{\partial y}(g\zeta + p) - m_x \left(\frac{\partial h}{\partial y} - z \frac{\partial H}{\partial y} \right) \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z}(mh^{-1}A_v \frac{\partial v}{\partial z}) + Q_v$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -gH(p - p_0)p_0^{-1} = -gHb \quad (10)$$

$$p = p(\rho, S, T) \quad (11)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(mHS) + \frac{\partial}{\partial x}(m_y HuS) + \frac{\partial}{\partial y}(m_x HvS) \quad (12)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial z}(mwS) = \frac{\partial}{\partial z}(mH^{-1}A_b \frac{\partial}{\partial z} S) + Q_S$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(mHT) + \frac{\partial}{\partial x}(m_y HuT) + \frac{\partial}{\partial y}(m_x HvT) \quad (13)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial z}(mwT) = \frac{\partial}{\partial z}(mH^{-1}A_b \frac{\partial}{\partial z} T) + Q_T$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(mHC) + \frac{\partial}{\partial x}(m_y HuC) + \frac{\partial}{\partial y}(m_x Hvc) \quad (14)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial z}(mwC) = \frac{\partial}{\partial z}(mH^{-1}A_b \frac{\partial C}{\partial z} + \omega C) + mHR_c + Q_C$$

여기서, A_b, A_v 는 수직난류점성-확산계수, C 는 용존 또는 부유물질의 농도, H 는 총수심($=h + \zeta$), f 는 Coriolis parameter, m_x, m_y 는 수평방향으로의 Scale factor, p 는 무차원화된 수압, S, T 는 수온, 염분, Q_c, R_c 는 생화학 및 외부 source-sink 항, Q_T, Q_S 는 수온 및 염분의 source-sink 항, Q_u, Q_v 는 운동량 생성-소멸 항, u, v 는 직교하는 곡선좌표계 x, y 에서의 수평유속, w 는 변환된 무차원 연직좌표계 z 에서의 수직 유속 성분, ρ 는 밀도, ω 는 침강속도를 나타낸다.

3.3 WASP

WASP (Water Quality Analysis Simulation Program) 모형은 U.S. EPA에서 1981년에 개발한 WASP 모형을 수정·보완한 것으로, 이후 1993년에 DOS기반 WASP5가 만들어졌고, 2001년에는 Windows를 기반으로 하는 WASP6로 발전되었다. 2006년에는 기존의 기능을 대폭 보완하고 3차원 수리모델과 연계 사용이 가능한 WASP7이 발표되었다(Ambrose et al., 1993; Wool et al., 2001; Ambrose et al., 2006). WASP 모형은 하천, 저수지, 하구, 해안 등 광범위한 수계에 적용할 수 있어 수질예측과 관리에 널리 사용되고 있는 모형이다.

WASP7의 경우, 기존 WASP 모형의 부모형인 부영양화모형 외에 여러 수질인자의 해석기능이 추가되었으며, 모델링결과에 대한 후처리 기능이 강화되어 이용자의 편의를 도모하고 있다. WASP5 모델의 경우에는 DYNHYD5 수리모델이 일차원 모형이므로 수리유동모의에 한계를 가지고 있는데 비해 WASP7은 3차원의 수리동역학 해석이 가능한 EFDC 프로그램과 연계하여 사용할 수 있다. WASP7에서는 모두 12개의 항목($\text{NH}_3\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-}$

P, Chlorophyll-a, CBOD, DO, Org-N, Org-P, Periphyton, Detritus, Benthic Algae, Salinity)을 모의할 수 있다.

WASP은 호수, 저수지, 하천, 연안 등의 다양한 수체의 수질문제를 분석할 수 있는 모델이며, 질량보존의 법칙에 근거한 방정식을 사용한다. 극미량의 수체에 대해 확산, 유동, 생화학적 변화, 외부로부터의 부하 등이 고려되며, 3차원 물질수지식은 Eq. (15)와 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial x}(U_x C) - \frac{\partial}{\partial y}(U_y C) - \frac{\partial}{\partial z}(U_z C) \quad (15) \\ & + \frac{\partial}{\partial x}(E_x \frac{\partial C}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial y}(E_y \frac{\partial C}{\partial y}) - \frac{\partial}{\partial z}(E_z \frac{\partial C}{\partial z}) \\ & + S_L + S_B + S_K \end{aligned}$$

여기서, C 는 수질 항목 농도(mg/L), E 는 확산계수(m²/day), S_B 는 경계 부하량(g/m³·day), S_K 는 전 동수학적 변화율(g/m³·day), S_L 은 확산용적당 부하량(g/m³·day), U 는 각 방향별 유속(m/day)이다.

4. 수치해석 결과

4.1 2차원 모형의 적용

4.1.1 RAM2

2차원 수질모형인 RAM4는 흐름모형인 RAM2와 연계되어 대상구간의 흐름환경에 따른 수질변화를 모의하게 된다. 모의구간인 남강댐 직하류부는 댐 방류량이 하류부의 유황에 지배적인 영향을 미치며, 남강댐 방류량이 적을 때에는 남강수중보에 의해 유량이 유지된다. 남강하천

기본계획(국토해양부, 2009)의 자료를 이용하여 Fig. 6과 같이 2,971개의 요소망과 2,889개의 절점을 가지는 유한요소격자망을 구성하였으며, 대상구간 내에 위치해 있는 판문천, 독산천, 나불천 등 3개의 지류를 모두 포함하였다. 상·하류 경계조건으로 유량은 남강댐 방류량인 136.1 m³/s을 사용하였으며, 수위는 수중보기립시의 수위 값인 EL. 19.55m를 사용하였다. 지류에서 유입되는 유량은 현장실측 자료인 Table 1의 값을 사용하였다. 모의구간의 조도계수는 남강하천기본계획(변경)보고서(국토해양부, 2009)와 장덕상(2010)이 현장답사를 통해 제시한 값을 고려하여 0.023의 값을 적용하였다. 이 값은 양안에 불임이 적은 하천의 경우 하천설계기준-해설(한국건설기술연구원, 2005)에서 조도계수의 범위로 한정된 0.025의 값과도 근사한 수치이다. 일반적으로 2차원 흐름모형을 이용한 수치모의에 있어서 조도계수는 흐름장에 민감한 영향을 미치는 매개변수로 작용하지만 이와 같은 민감도는 0.01 이상의 값 차이가 발생할 때 주로 나타나므로 본 연구에서는 상기의 내용을 바탕으로 조도계수를 0.023으로 입력하였다.

Fig. 7은 RAM2에 의한 모의구간의 등유속도를 나타낸 것으로 판문천 이전 구간의 협착부에서 고유속이 발달하였고, 나불천에 의한 지류유량의 합류로 본류의 좌안측에 느린 흐름이 나타났다. Fig. 8은 RAM2에 의한 모의구간 하류부에서의 유속벡터도를 도시한 것이다. 하류단 경계인 남강수중보 지형에 의해 보를 월류하는 유속이 빠르게 분포하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 9는 Fig. 2에 표시된 5개의 단면에서의 ADCP에 의한 유속실측값과 RAM2의 모의결과를 비교한 그래프이다. 이 그림에서 유속의 범위는 0.2~0.5m/s 정도이며, 단면 별 최대유속과 최소유속의 차

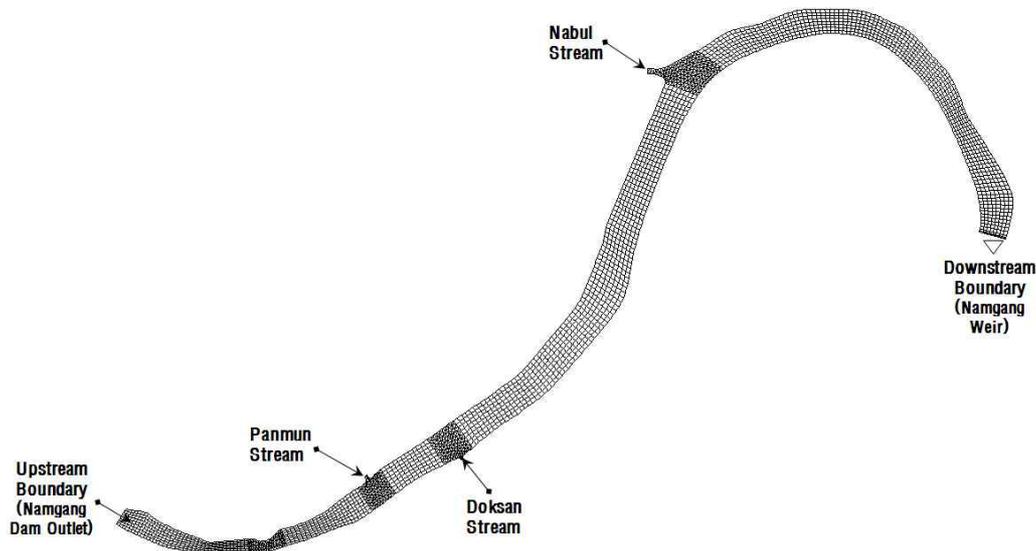


Fig. 6. Mesh Layout

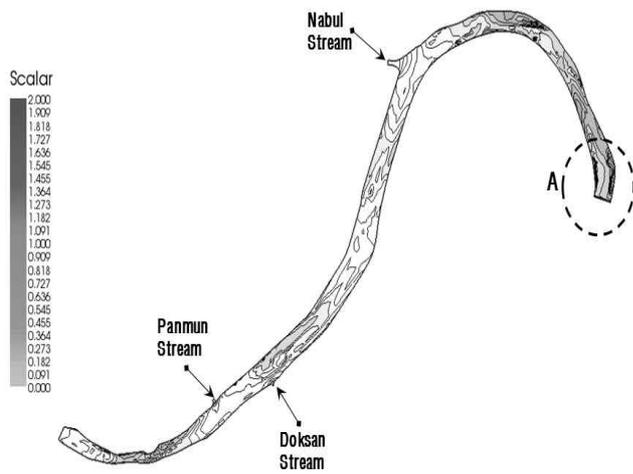


Fig. 7. Velocity Contour by RAM2 Model

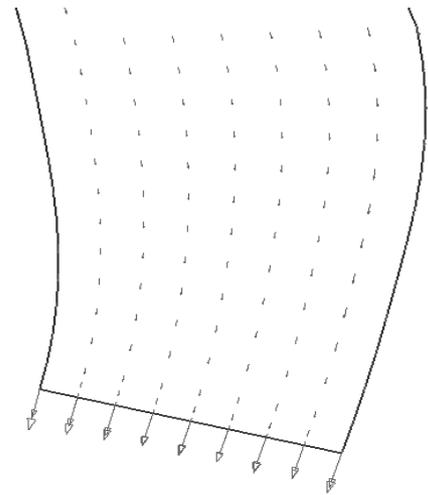
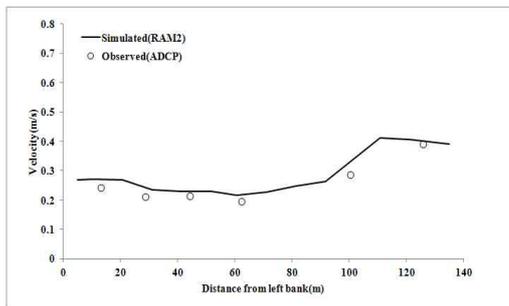
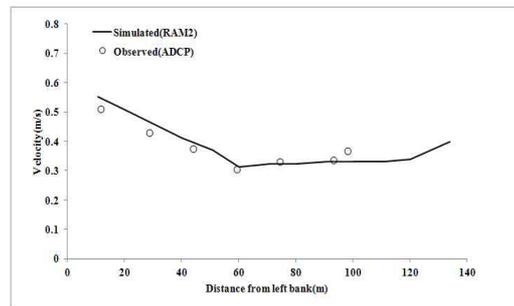


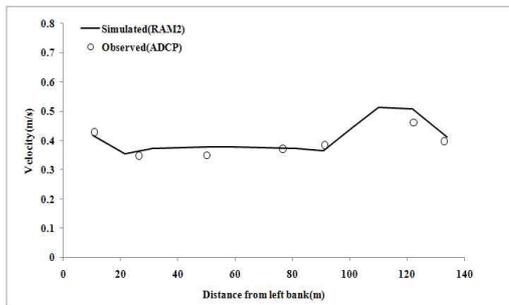
Fig. 8. Velocity Vector Around Submerged Weir (A in Fig. 7)



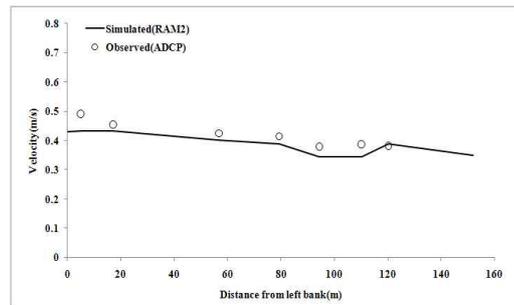
(a) Section 1



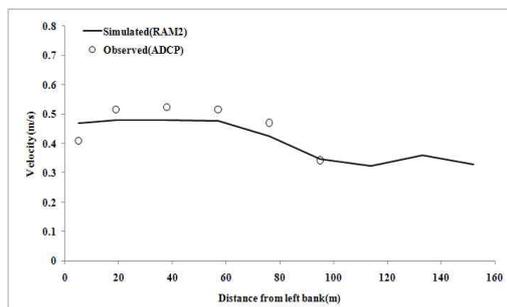
(b) Section 2



(c) Section 3



(d) Section 4



(e) Section 5

Fig. 9. Velocity Comparison between RAM2 Result and ADCP Measurement

이는 약 0.1~0.2 m/s임을 확인할 수 있다. 또한 횡단면을 따른 수치모의에 의한 유속의 증감경향이 ADCP 실측값과 잘 일치함을 알 수 있다.

4.1.2 RAM4

선행된 RAM2 모의결과를 이용하여 RAM4 모의를 수행하였다. 수질모의는 현장조사를 통해 채수된 BOD에 대한 모의로 국한하였으며, 지천유입농도는 현장 실측에 의한 Table 2의 수질 분석결과를 바탕으로 Table 3과 같이 입력하였다.

RAM4의 매개변수는 종·횡분산계수 및 BOD 감쇠계수이다. 종분산계수 및 횡분산계수의 경우 국내 하천에 대한 실측자료가 매우 부족하고, 국내 하천에 적합한 경험식이 존재하지 않으므로, 널리 사용되는 Elder와 Fischer의 경험식(Fischer 등, 1979)을 이용하여 다음과 같이 산정하였다.

$$D_L = 5.93d\sqrt{gdS} = 2.2 \text{ m}^2/\text{s} \quad (16)$$

$$D_T = 0.6d\sqrt{gdS} = 0.22 \text{ m}^2/\text{s} \quad (17)$$

위 식에서 d 는 수심, g 는 중력가속도, S 는 하상경사를 의미하며 모의대상지역이 만곡이 잘 발달한 하천이므로 Eq. (17)의 횡분산계수 산정식에서 0.6의 계수를 적용하였다. BOD의 이송확산은 탈산소계수(k_1)와 재폭기계수(k_2)에 의해 생성과 소멸에 대한 반응성이 결정된다. EPA (1987)에

Table 3. Boundary Condition for RAM4

Tributary	BOD (mg/L)
Main stream (Namgang Dam Outlet)	1.52
Panmun Stream	6.40
Doksan Stream	3.60
Nabul Stream	0.95

Table 5. Reaeration coefficient (k_2) (Chapra, 1997)

Nature of streams	Ranges of k_2 AT 20°C (/day)
Small pond and backwater	0.10 ~ 0.23
Large stream of low velocity	0.23 ~ 0.35
Large stream of moderate velocity	0.35 ~ 0.46
Swift streams	0.46 ~ 0.69
Rapids and water falls	> 1.15

의하면 k_1 은 0.02~3.4/day 정도의 범위를 가지며, 대부분의 하천에서는 Table 4와 같이 0.1~0.5/day 정도의 값을 가지므로 본 연구에서는 0.2/day를 입력하였다.

k_2 는 Table 5와 같이 유속이 빠를수록 대기로부터 수체로 유입되는 산소량이 많아져서 높은 재폭기계수값을 가지게 된다. 본 연구에서는 남강댐 방류량과 모의구간의 유속을 고려하여 0.38/day를 입력하였다.

이상의 종·횡분산계수, 탈산소계수와 재폭기계수를 이용하여 RAM4에 의한 BOD의 이송확산모의를 수행하고, 모의결과를 Fig. 5에 표시된 5개의 본류 실측지점에서의 농도값과 비교하여 Fig. 10에 수록하였다. 이 그림에서 W2(천수교)와 W3(진주교) 지점의 양안의 농도를 제외하고는 실측값과 모의값의 평균적인 거동이 잘 일치함을 알 수 있다. 이는 탈산소계수와 재폭기계수, 분산계수 등의 매개변수가 올바르게 입력되었음을 의미하는 결과이다.

이상으로 RAM4 모형의 검증이 완료되었다고 가정하고 시간에 따른 BOD의 농도장을 모의한 결과를 Fig. 11~14에 도시하였다. 판문천과 독산천에서 각각 6.4 mg/L, 3.4 mg/L로 비교적 높은 농도가 본류로 유입되지만 유량이 매우 작아서 횡방향으로의 확산이 활발하게 일어나지 못하고 종방향 확산만이 두드러졌으며, 두 지류의 농도가 본류에 미치는 영향도 크지 못했다. 판문천과 독산천의 영향으로 조금 높아진 농도는 0.95 mg/L로 비교적 낮은 농도를 띄는 나불천의 유입으로 다시 낮아지는 것을 확인할 수 있다.

Table 4. Deoxygenation Coefficient (k_1) (EPA, 1987)

Treatment	Ranges of k_1 AT 20°C (/day)
Untreated	0.30 ~ 0.50
Primary	0.10 ~ 0.30
Activated sludge	0.05 ~ 0.10

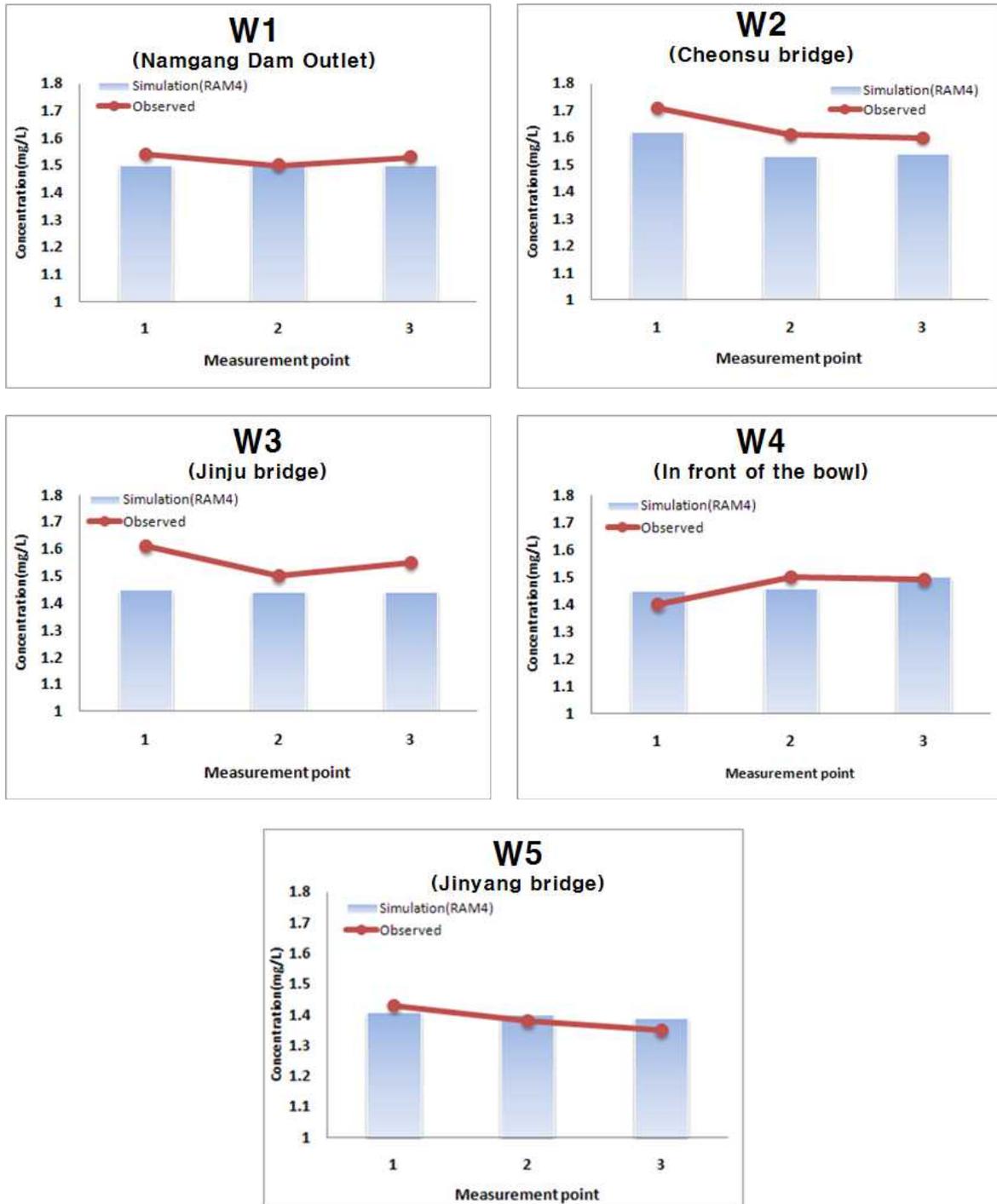


Fig. 10. Calibration and Verification of RAM4 Result

4.2 3차원 모형의 적용

3차원 수리모형인 EFDC와 수질모형인 WASP을 연계 모의 하기 위해서는 EFDC에 의한 동수역학적 유동해석이 선행되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 EFDC Hydro

version을 통해 WASP7의 입력자료로 이용되는 HYD 파일을 생성하였다. EFDC-WASP 연계모의 모식도는 Fig. 15와 같다. 선행되어진 EFDC의 모델경계조건은 RAM2 모의 때와 동일한 남강댐 방류량과 지류 실측 유량을 입력하였다. 격자 구성은 SMS 인터페이스를 통해 가변격자

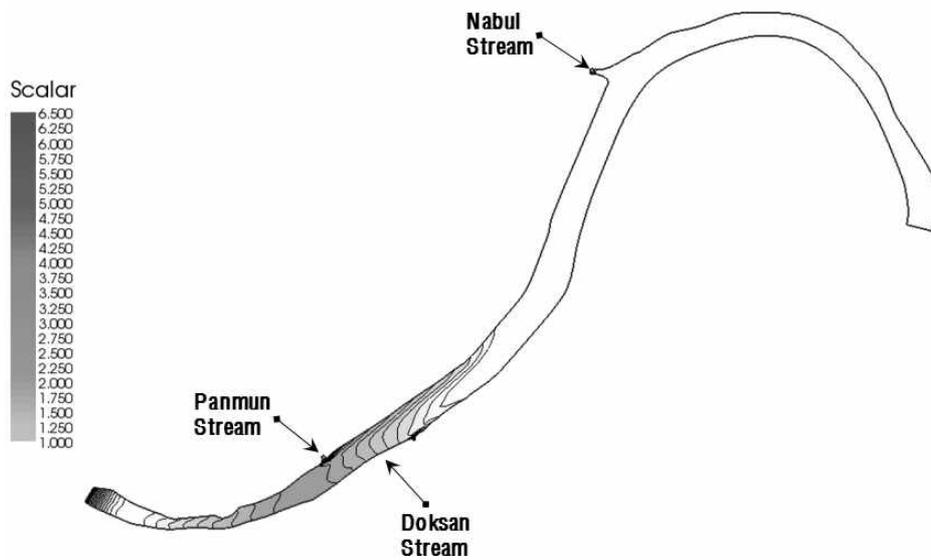


Fig. 11. BOD Concentration Field at $t=2$ hr

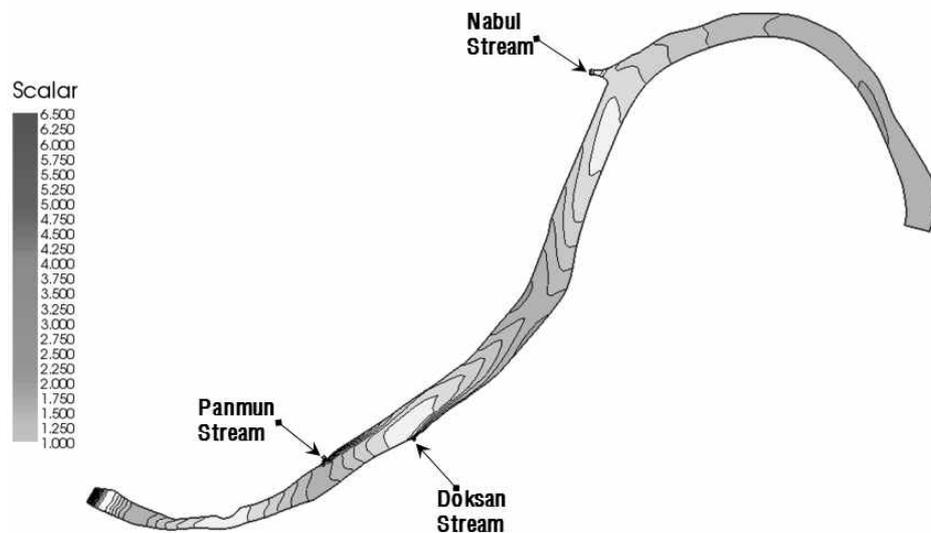


Fig. 12. BOD Concentration Field at $t=8$ hr

로 구성하였다. Fig. 16은 생성된 격자를 나타낸 것으로 수평방향으로는 99개(I열: 33, J열: 3), 수직방향 격자는 3개(k열: 3)의 층으로 구성되어 총 297개의 격자를 구성하였다. Fig. 17에 수심평균 유속분포와 층별 유속분포를 나타내었으며, Fig. 18에는 층별 종단유속벡터도를 수록하였다. RAM2 모의결과와 마찬가지로 하류단인 수중보 지점에서의 유속이 가장 빨랐으며, 수면과 가장 가까운 Layer 3에서 빠른 유속이 분포함을 알 수 있다.

EFDC 모의 후 3차원 유속과 수위 등의 수리학적 정보를 포함하고 있는 HYD 파일을 WASP의 유동 모듈로 대

체하여 WASP7에 의한 BOD 수질모의를 수행하였다. 모 델경계조건은 RAM4 모의 때와 동일한 현장조건을 입력 하였다. Fig. 19는 모의 시작 후 24시간 동안의 WASP모 의 결과를 나타낸 것이다. 나불천과 독산천으로부터 유 입된 오염물질에 의해 12시간까지 종방향 혼합이 활발하 게 진행되었으며 이후 농도장이 정상상태로 도달하는 것 을 확인할 수 있다. 또한 24시간에서의 EFDC-WASP 연 계모의에 의한 BOD 농도분포와 RAM2-RAM4 연계모 의에 의한 BOD 농도장(Fig. 13)이 서로 유사함을 알 수 있다.

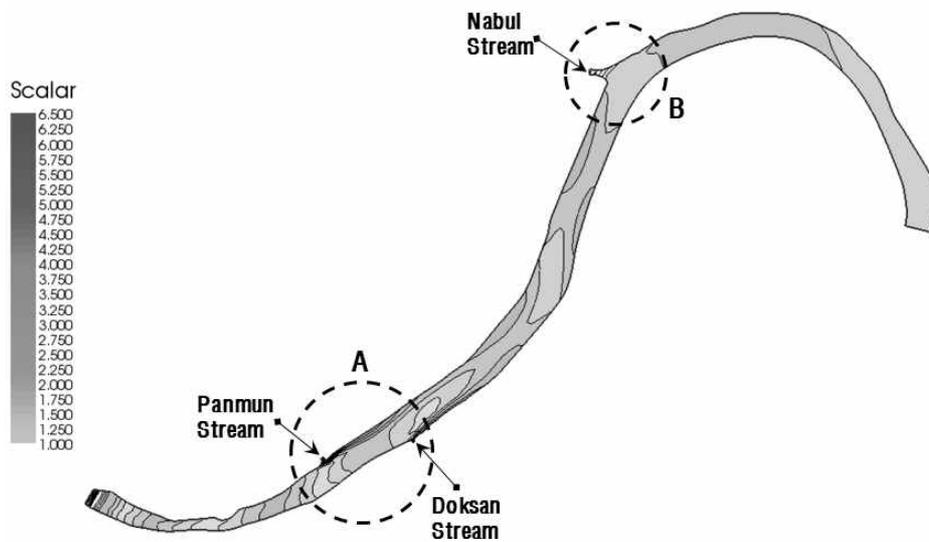


Fig. 13. BOD Concentration Field at $t=24$ hr

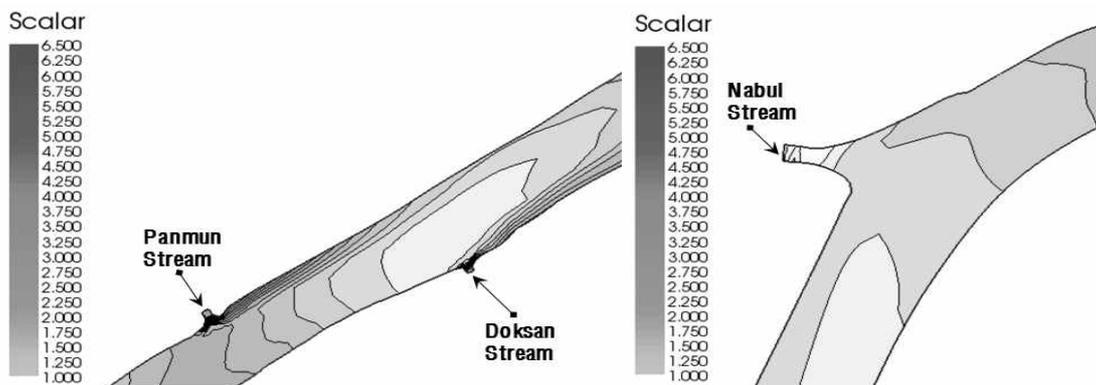


Fig. 14. BOD Concentration around Tributaries at $t=24$ hr (Left: A in Fig. 13; Right: B in Fig. 13)

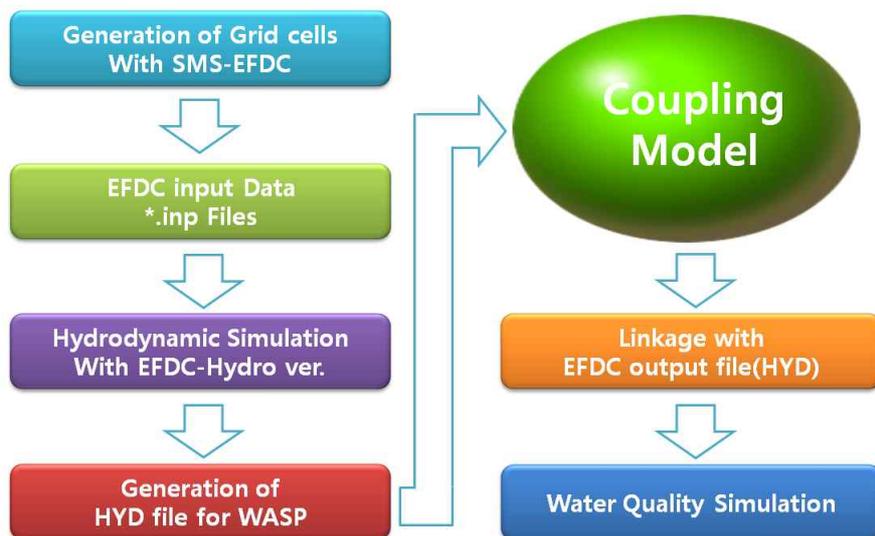
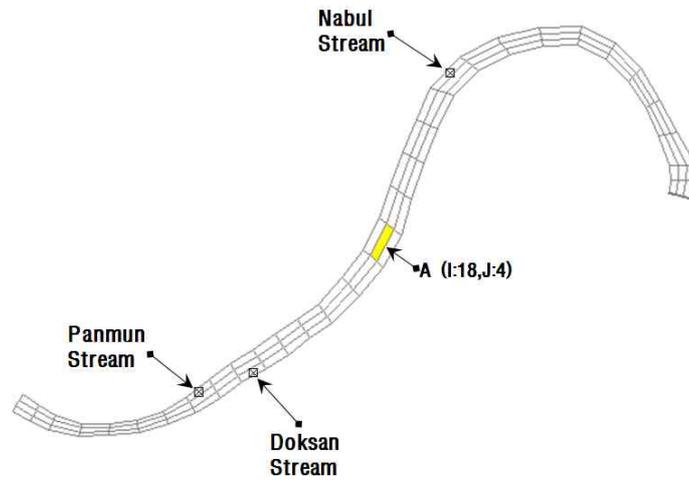
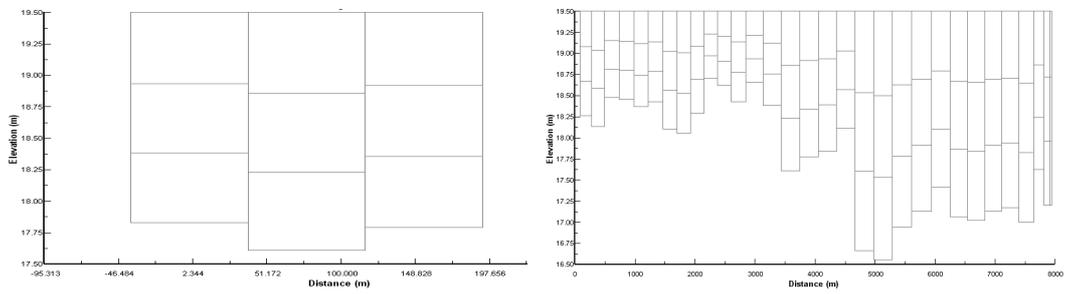


Fig. 15. Simulation Procedure for EFDC-WASP Coupled Modeling



(a) Horizontal grid



(b) Vertical grid at I=18 and J=4

Fig. 16. EFDC Grid Layout

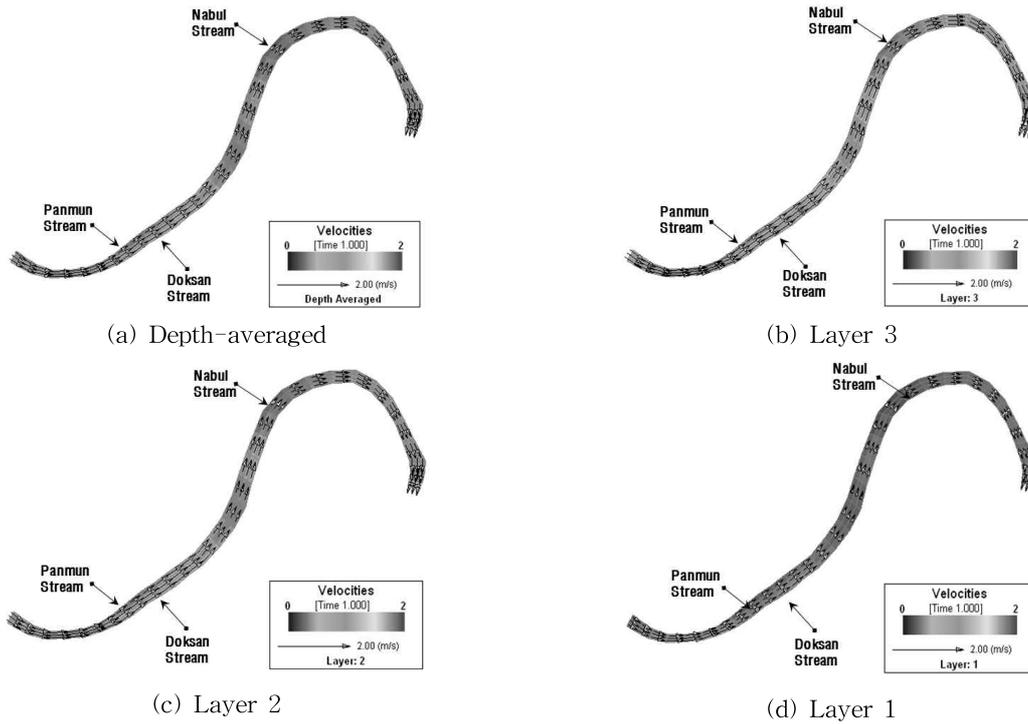


Fig. 17. Velocity Distributions by Layers

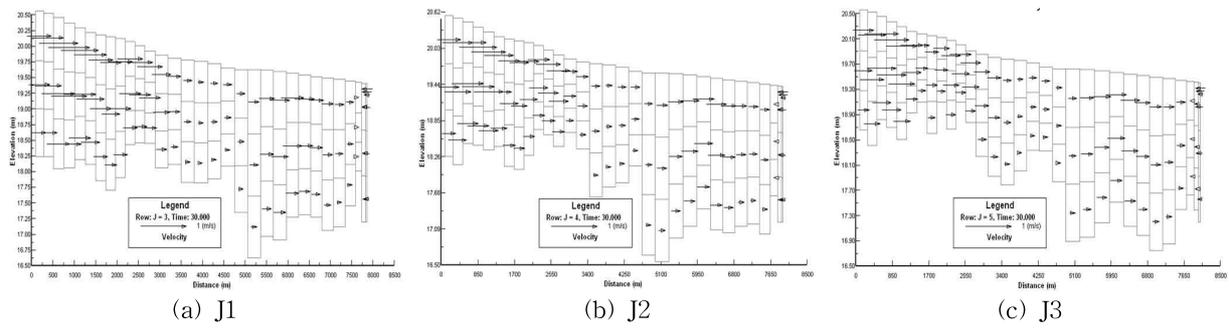


Fig. 18. Velocity Configuration along the Longitudinal Direction

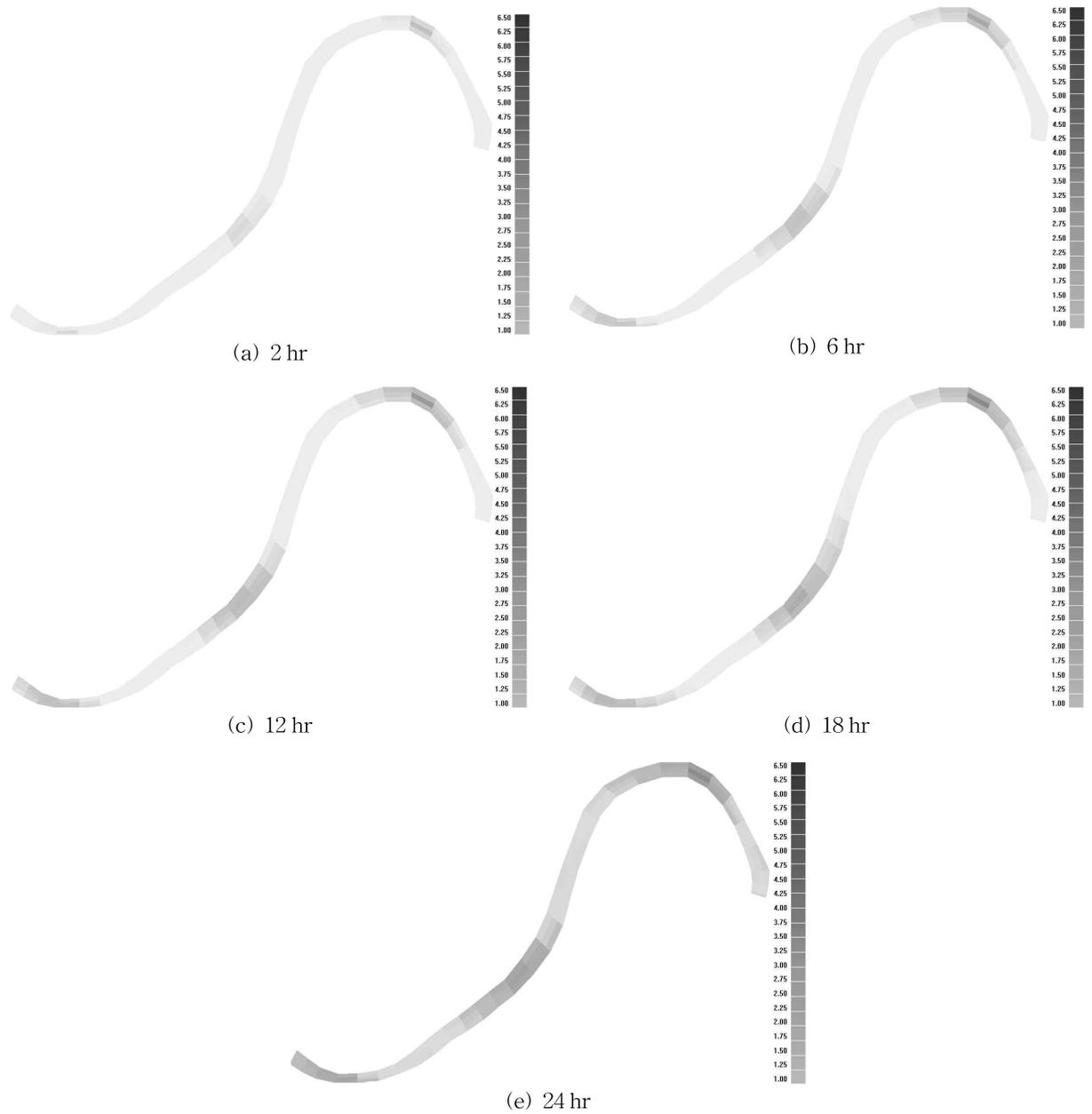


Fig. 19. Concentration Field by WASP Results

5. 결론

국내하천에서의 수리·수질 해석에는 1차원 및 2차원 모형이 주로 이용되고 있으며, 최근에는 3차원 모형의 적용이 활발하게 이루어지고 있다. 이에 따라 댐, 수중보 등의 인공구조물과 지천을 포함하며 만곡흐름을 특징으로 하는 수심이 비교적 얇은 중규모 도시하천에서의 3차원 모형의 적용성을 검토할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 수질개선 방안과 오염원 저감 계획의 수립이 필요한 남강댐 하류를 모의대상 영역으로 선정하여 2차원 모형인 RAM2- RAM4와 3차원 모형인 EFDC-WASP를 준연계 모의하여 결과를 비교하고 모형의 적용성을 검토하였다. 이를 위해 ADCP를 이용하여 유속을 측정하고 시료채수에 의한 BOD 농도를 측정하여 수치모의를 위한 입력자료와 검증자료로 활용하였다. 2차원 흐름해석 모형인 RAM2 적용 결과 남강댐 방류량이 평수기 방류량 50 m³/s보다 큰 136.1 m³/s인 경우 만곡부 5개 횡단 측선에서의 유속의 범위는 0.2~0.5m/s 정도였으며 하폭방향 유속의 증감경향이 ADCP 실측값과 잘 일치하였다. 또한 3차원 모형인 EFDC와 유속 분포 및 보 월류 유속이 유사하였다. 정상상태 도달 후의 EFDC-WASP 연계모의에 의한 BOD 농도와 RAM2-RAM4 연계모의에 의한 BOD 농도장이 모의영역 전반에 걸쳐 1~2 ppm 정도로 유사하게 나타났다. 남강댐 하류부의 경우 하상경사가 매우 완만하고 유속이 비교적 느리며 성층 현상이 발생할 정도로 수심이 깊지 않으므로 수리 및 수질이 남강댐 방류량에 의한 수량에 크게 좌우된다. 남강댐 방류량은 하류부의 수질 및 연안 어업환경에 큰 영향을 미치므로 향후 이에 대한 정량적, 공학적 분석 시 계산의 효율성 및 모형의 적용성의 측면에서 2차원 준연계 모형을 적용하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호: 2-3-3; 과제명: RAMS 적용)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

경남발전연구원(2010). 남강댐 하류 수질개선방안 연구보고서.
국토해양부(2009). 남강 하천기본계획(변경) 보고서.

권기환, 서동일, 윤진호, 주명호(2008). “EFDC와 WASP을 이용한 대청호 수리-수질 연계 모델링.” **2008 대한상하수도학회·한국물환경학회 공동추계학술발표회논문집**, pp. 29-30.

김지원(2008). 부항호 수질예측을 위한 CE-QUAL-W2와 EFDC-WASP모델의 적용 비교. 석사학위논문, 충남대학교.

서동일, 서미진, 구명서, 우재균(2009). “EFDC-Hydro와 WASP7.2를 이용한 금강하류의 수리-수질 연계모델링.” **상하수도학회지**, 상하수도학회, 제23권, 제1호, pp. 15-22.

서울대학교(2004). 하천흐름 및 하상변동 해석기술 개발. 21세기 프론티어 연구개발사업-수자원의 지속적인 확보 기술개발사업, 과학기술부, pp. 266-281.

서울대학교(2009). RAMS (River Analysis & Modeling System) User's Manual.

서일원, 김성은(2010a). “RAMS 및 SMS 모형을 이용한 낙동강 본류 구간의 흐름분석 및 부유사 거동 모의.” **2010 한국방재학회 학술발표회 논문집**, 한국방재학회, pp. 316-319.

서일원, 김성은, Yasuhisa M, Tadaharu I. (2011a). “항공사진분석 자료를 이용한 2차원 하천흐름 해석모형의 검증.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제31권, 제6B호, pp. 515-522.

서일원, 송창근(2007). “2차원 이송분산모형을 이용한 한강 본류 구간에서의 BOD 거동 모의.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제27권, 제6B호, pp. 573-581.

서일원, 송창근, 이명은(2008). “한강 감조구간에서의 흐름 및 혼합거동.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제28권, 제6B호, pp. 731-741.

서일원, 전인욱, 송창근, 신재현(2009a). “2차원 하천해석모형(RAMS)을 이용한 남한강 준설에 따른 부유사 영향 검토.” **제35회 대한토목학회 정기학술대회 논문집**, 대한토목학회, pp. 737-740.

서일원, 최남정, 전인욱, 송창근(2009b). “팔당호에 유입된 비보존성 오염물질의 혼합거동.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제29권, 제3B호, pp. 221-230.

서일원, 최황정, 김성은(2010b). “BOD와 DO 거동 해석을 위한 수평 2차원 유한요소모형의 개발 및 검증.” **2010 한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 749-753.

서일원, 최황정, 송창근(2011b). “열오염 혼합 거동 해석을 위한 수평 2차원 유한요소모형.” **대한토목학회논문집**,

대한토목학회, 제31권, 제6B호, pp. 507-514.

서일원, 한건연, 최성욱, 김홍식(2010c). 지표수 거동해석을 위한 RAMS의 사용자 설명서 및 튜토리얼. SWRRC TR 2010-16.

이명은(2007). Two-Dimensional Finite Element Model for pollutant Transport Analysis. 박사학위논문, 서울대학교.

이명은, 서일원(2008). “순간 유입된 오염물질의 혼합 모의 시 질량 오차 산정.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제28권, 제5B호, pp. 475-483.

이용성, 서동일, 박병준(2008). “EFDC와 WASP을 이용한 광동댐의 수리-수질 연계 모델링.” 2008 **대한상하수도학회·한국물환경학회 공동추계학술발표회논문집**, pp. 71-72.

장덕상(2010). 남강댐 하류의 인위적 교란에 관한 연구: 하도지형 및 수리 특성을 중심으로. 석사학위논문, 진주산업대학교.

정영원(2009). *3-Dimensional Hydrodynamic and Water Quality Change Simulation of Reservoir Using EFDC-WASP*. 석사학위논문, 인제대학교.

최승용, 김병현, 김상호, 한건연(2009). “2차 요소를 이용한 2차원 상향가중 유한요소모형.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제42권, 제12호, pp. 1053-1067.

한국건설기술연구원(2005). 하천설계기준·해설.

Ambrose, R.B., Martin, J.L., and Wool, T.A. (2006). *WASP7 Benthic Algae-Model Theory and User's Guide*. U.S. EPA, Athens, GA.

Ambrose, R.B., Wool T.A., and Martin, J.L. (1993). *The Water Quality Analysis and Simulation Program, WASP5: Part A, Model Documentation*. U. S. EPA, Athens, GA.

Chapra, S.C. (1997). *Surface water-quality modeling*. McGraw-Hill.

Environmental Protection Agency (1987). *The enhanced stream water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: documentation and user manual*.

Fischer, H.B., List, E.J., Koh, R.C.Y., Imberger, J., and Brooks, N.H. (1979). *Mixing in inland and coastal waters*, Academic Press, Inc.

Hamrick, J.M. (1992). *A Three-Dimensional Environmental Fluid Dynamics Computer Code: Theoretical and Computational Aspects*, The College of William and Mary, Virginia Institute of Marine Science. Special Report, No. 317.

Norton, W.R., King, I.P., and Orlob, G.T. (1973). *A finite element model for lower granite reservoir*. *Water Resources Engineers, Inc.*, Walnut, California.

Wool, T.A., Ambrose, R.B., Martin, J.L., and Coner, E.A. (2001). *The Water Quality Analysis and Simulation Program, WASP6: Part A, Model Documentation*. U. S. EPA, Athens, GA.

논문번호: 11-135	접수: 2011.12.27
수정일자: 2012.02.06	심사완료: 2012.02.06