

RMA2/RMA4 모형을 이용한 서낙동강 수문연계운영의 수질개선 효과 예측

이금찬 · 윤영삼* · 이남주**

한국건설기술연구원 하천·해안항만연구실, *국립환경과학원 낙동강물환경연구소

**경성대학교 건설환경공학부

(2009년 5월 6일 접수; 2009년 6월 22일 수정; 2009년 8월 5일 채택)

Prediction of Water-Quality Enhancement Effects of Gates Operation in the West-Nakdong River Using RMA2/RMA4 Models

Keum-Chan Lee, Young-Sam Yoon* and Nam-Joo Lee**

Korea Institute of Construction Tech., River, Coastal and Harbor Research Division, Gyeonggi 411-712, Korea

**Nakdong River Water Environment Research Center, National Institute of
Environmental Research, Gyeongbuk 717-873, Korea*

***Department of Civil and Environmental Engineering, Kyungpook University, Busan 608-736, Korea*

(Manuscript received 6 May, 2009; revised 22 June, 2009; accepted 5 August, 2009)

Abstract

An objective of this study is as follows: 1) performing sensitivity analysis and parameter estimation of RMA2 and RMA4 models for the West-Nakdong River, 2) drawing up alternatives of gates-operation for water-quality enhancement, and 3) quantitative evaluation of methodology of 'flow-restoration by gates-operation' among 'Comprehensive Plan Improving Water-Quality in the West-Nakdong River(WNR)' with the target water-quality(BOD at Nakbon-N point: below 4.3 mg/L). The parameters for the RMA2 (depth-averaged two-dimensional flow model) and RMA4 (depth-averaged two-dimensional water-quality model) were determined by sensitivity analysis. Result of parameter estimation for RMA2 and RMA4 models is 1,000 Pa · s of the eddy viscosity, 20 of the Peclet number, 0.025 of the Manning coefficient, and 1.0 m²/s of the diffusion coefficient. We have evaluated the effects of water-quality enhancement of the selected alternatives by numerical simulation technique with the models under the steady-state flow condition and the time-variant transport condition. Because of no-resuspension from river bottom and considering BOD as conservative matter, these simulation results slightly differ from real phenomena. In the case of 50 m³/s of Daejeo-gate inflow, two-dimensional flow pn results result represents that small velocity occurs in the Pyungkang Stream and no flow in the Maekdo River. In the WNR, there occurs the most rapid flow near timhae-bridge. In the WNR, changes of water-quality for the four selected simulation cases(6, 10, 30, 50 m³/s of the Daejeo-gate inflow) were predicted. Since the Daejeo-Gate and the Noksan-Gate can be opened up to 7 days, it would be found that sustainable inflow of 30 m³/s at the Daejeo-gate makes BOD in the WNR to be under the target of water-quality.

Key Words : the West-Nakdong River, Sensitivity analysis, Two-dimensional model, Gates operation

1. 서론

낙동강의 하류에 위치한 서낙동강은 상류와 하류에 수문이 설치되어 있어서 정체수역이 형성되는 전형적인 호소형 하천이다. 낙동강과 연결되는 상류의 대저수문과 바다로 연결되는 하류의 녹산수문은 1934년에 농업용수 확보를 위하여 건설되었으며, 1992년에 녹산 제2수문이 건설되었고, 1997년에는 대저수문의 규모를 확대하였다.

현재의 서낙동강의 상황은, 과거 염수침입을 막는 녹산수문과 담수 조절을 위한 대저수문이 농업용수 확보에 크게 기여하였으나, 수문에 의해 수체가 정체됨에 따라 호소형 하천의 문제점이 심각하게 나타나고 있다. 서낙동강 유역은 경남 김해시와 부산 강서구로부터 발생하는 다양한 다량의 오염물이 유입되고 있으며, 정체수역으로 유입되는 과다한 영양염류로 인해 수질이 악화되었고, 자정능력이 크게 저하된 상황이다. 이에 중앙정부 및 지방자치단체는 최근 날로 커지고 있는 지역주민의 끊임없는 요구에 부응하기 위해 최근 서낙동강의 수질개선을 위한 오염총량제, 서낙동강 수질개선 종합대책들을 마련하여 추진 중에 있다.

이 연구는 서낙동강의 수질문제를 해결하기 위해서, 가장 기본적인 방안으로서 '수문연계운동을 통한 정체수역 해소'를 선택하고, 평면 이차원 흐름 및 수질 예측 수치모형인 RMA2 모형과 RMA4 모형을 사용하여 다수의 수문운영 조건에 대해 대저수문과 녹산수문의 유수 소통능력을 수리학적으로 평가하고, 서낙동강의 수질개선을 위한 적절한 유량 및 수문 연계운영 효과를 검토하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 대상구간 현황조사

서낙동강관계기관합동¹⁾ 조사에 의하면, 서낙동강은 낙동강의 파천으로 유로연장은 18.5 km인 국가하천이다. 서낙동강 유역 중 지반고가 10 m 이하인 면적이 강서구 지역의 69.1%, 김해시 지역의 69.9%에 이르며, 이 중 상당한 면적이 지반고 0.7~1.5 m인 저지대 평야로 구성되어 있어 홍수시 유역의 60% 이상이 침수되는 상습 수해지구에 해당한다.

Fig. 1은 서낙동강 유역도에 주요 배수펌프장을

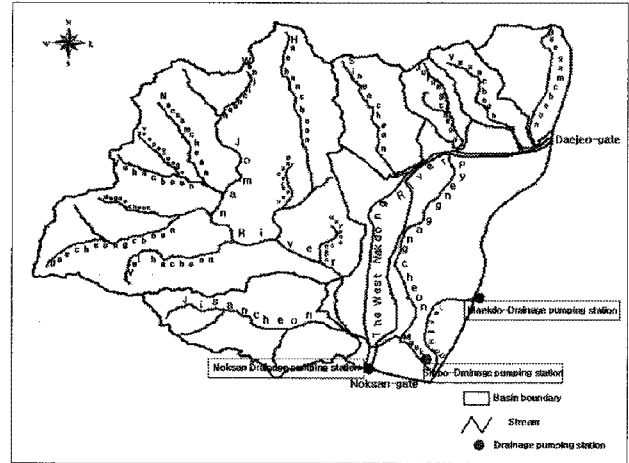


Fig. 1. The West-Nakdong River basin.

추가로 표시한 그림이다. 환경관리공단 서낙동강 수질개선타당성 조사보고서²⁾에 의하면 서낙동강 유역은 하천과 지형 및 지세를 고려할 때, 서낙동강 좌안측의 평강천 및 맥도강 배수구역, 우안측에 대감천, 예안천, 주중천, 신어천 배수구역, 조만강 배수구역, 지사천 배수구역 등 4개 대배수구역으로 구분할 수 있다. 또한 서낙동강에는 강제배수로써 수위조절이 가능하도록 서낙동강 하류에 녹산배수펌프장과 맥도강에 맥도배수펌프장, 신포배수펌프장이 설치되어 있다.

서낙동강, 평강천 및 맥도강의 국가하천 구간은 평상시 녹산수문의 배수영향을 받고 있는 저수지의 특징을 갖고 있어서 수위 관측 및 유속 측정에 의한 유출분석이 곤란하다. 서낙동강 하류단인 녹산수문의 방류량 분석은 가능하지만, 유출이 수문운영에 의해 제어되는 특징을 가지고 있어서 유황분석에 직접 활용할 수 없다. 따라서 다음 식과 같은 비유량법을 사용하여 서낙동강의 유황분석을 수행하였다.

$$Q' = Q(A'/A) \tag{1}$$

여기서, A=인접 하천의 유역면적, A'=대상 하천의 유역면적, Q=인접 하천의 유황고, Q'=대상 하천의 유황이다.

이 등³⁾에 의하면 서낙동강 하천정비기본계획 시 유황분석에 사용된 낙동강 상류 안동댐 지점의 유황자료와 서낙동강 유역면적과 유사한 양산천 지점의 유황자료를 비유량법을 통해 유황분석 결과를 비교함으로써 좀 더 신뢰성 있는 서낙동강 유역의

유황분석결과를 얻을 수 있었다. 안동댐 지점의 유황자료를 사용할 경우 풍수량은 13.26%, 평수량은 15.61%, 저수량은 12.86%, 갈수량은 2.52% 작게 추정된다. 따라서 양산천 유역의 유황분석 결과를 사용하여 서낙동강 각 지천하구에서의 유황분석을 수행하였다.

Table 1은 유황분석결과를 정리한 것이며, 환경관리공단²⁾에서 발행한 “서낙동강 수질개선방안 타당성조사 보고서”의 서낙동강 하천유역면적을 사용하였다. 안동댐과 양산천 유역면적 및 유황자료는 국가수자원관리종합시스템(WAMIS) 자료를 사용하였다

서낙동강으로 유입되는 지천의 2004년도 수질환경기준 달성현황을 보면 Table 2에서 보는 바와 같이 서낙동강으로 유입되는 조만강 등 유입지천의 연평균수질은 BOD 기준으로 IV등급 이내가 6개소,

IV등급을 초과하는 지점이 1개소에 불과하지만, 낙본N 지점의 목표수질인 BOD 4.3 mg/L와 비교하면 신어천, 조만강, 평강천, 맥도강 4개 측정지점에서 목표수질을 초과하고 있다.

서낙동강관계기관합동¹⁾에 의한 “서낙동강 수질개선 종합대책”에서 낙동강수계 오염총량관리 대상 오염물질인 BOD를 기준으로 서낙동강 유역의 수질변화를 검토하였으며, 환경부의 물환경정보시스템(WEIS) 자료를 사용하여 서낙동강 본류의 최근 10년간 BOD 변화를 지점별로 정리하면 Table 3과 같다. BOD 농도를 기준으로 서낙동강 본류의 연평균수질은 2000년 김해시 화목하수처리장이 건설된 이후 개선되고 있으나, 서낙동강 유역 기준지점(낙본N, 녹산수문)의 목표수질인 BOD 4.3 mg/L을 대부분 초과하고 있는 상황이다.

2.2. 수치 모형의 기본 이론

RMA2 모형은 미공병단에서 1973년에 처음 개발된 이래로, 하중도를 포함한 하천 수로구간의 흐름, 교각 부근의 흐름, 유수단면 확대 및 축소부를 포함한 하천구간의 흐름 등, 하천, 저수지, 하구의 수리동역학적 해석에 널리 사용되어 왔다.

RMA2 모형은 다음과 같은 천수가정을 사용하여 3차원 Reynolds 방정식과 연속방정식을 수심적분한 천수방정식을 지배방정식으로 사용한다. ① 수직방

Table 1. Flow duration analysis by specific discharge measurement

River	Sites	Area (km ²)	Flow(m ³ /s)			
			Q ₉₅	Q ₁₈₅	Q ₂₇₅	Q ₃₅₅
Nakdong	Andong dam	1,584.0	23.1	11.1	5.9	2.2
Yangsan	Nakdong Haguun	245.7	4.13	2.04	1.05	0.35
WNR	Noksan sumoon	248.2	4.17	2.06	1.06	0.35
Yeaan	Nakdong Haguun	7.8	0.13	0.06	0.03	0.01
Jujoong	"	8.7	0.15	0.07	0.04	0.01
Shineu	"	18.0	0.30	0.15	0.08	0.03
Joman	"	132.4	2.23	1.10	0.57	0.19
Jeesa	"	31.5	0.53	0.26	0.13	0.04
Pyeonggang	"	40.4	0.68	0.34	0.17	0.06
Daegam	"	15.7	0.26	0.13	0.07	0.02
Macdo	Joint of Pyeong gang	26.7	0.45	0.22	0.11	0.04

Table 2. Achievement of water quality criterion in inflow branch rivers

River Items	Yea an	Ju joong	Shin eo	Jo man	Jee sa	Pyeonggang	Mac do
BOD	3.1	1.1	8.3	6.5	1.8	7.7	6.5
Grade	III	II	V	IV	II	IV	IV

Table 3. Water quality state of the West-Nakdong River (BOD, mg/L)

Year	WNR main stream					Nakdong
	Kim Hae Gyo	Gang Dong Gyo	Jo Man Gyo	Doon Chi Gyo2	Shi Man Gyo	Gu Po Gyo
1999	5.1	7.0	5.9		25.7	3.1
2000	5.4	6.6	8.5		16.8	2.9
2001	4.4	4.6	5.6		12.1	3.2
2002	4.3	4.5	5.5		11.1	2.5
2003	3.4	3.8	5.6	3.7*	9.0	2.2
2004	5.4	6.7	7.1	4.5*	12.2	2.8
2005	4.2	4.3	6.6	6.2	9.2	3.0
2006	4.1	5.2	5.2	5.2	8.4	2.7
2007	3.5	3.7	5.3	4.8	6.2	2.6
2008	4.3	3.7	5.7	6.1	5.9	2.4
Ave.	4.41	5.01	6.1	5.58	11.66	2.74

향의 속도와 가속도는 무시한다. ② 하천바닥은 시간에 대해 변하지 않는다.

시간 적분된 연속방정식을 수심평균하면 식(2)의 연속방정식이 유도된다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} + h \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) = 0 \quad (2)$$

3차원 Reynolds 방정식을 수심적분한 2차원 천수 방정식은 식(3a)~식(3b)와 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} & h \frac{\partial u}{\partial t} + hu \frac{\partial u}{\partial x} + hv \frac{\partial u}{\partial y} \\ & - \frac{h}{\rho} (\epsilon_{xx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \epsilon_{xy} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}) \\ & + gh \left(\frac{\partial a}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{g \omega n^2}{h^{1/3}} (u^2 + v^2)^{1/2} \\ & - \zeta V_a^2 \cos \Psi - 2h \omega v \sin \phi = 0 \end{aligned} \quad (3a)$$

$$\begin{aligned} & h \frac{\partial v}{\partial t} + hu \frac{\partial v}{\partial x} + hv \frac{\partial v}{\partial y} \\ & - \frac{h}{\rho} (\epsilon_{yx} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \epsilon_{yy} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}) \\ & + gh \left(\frac{\partial a}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{g \omega n^2}{h^{1/3}} (u^2 + v^2)^{1/2} \\ & - \zeta V_a^2 \sin \Psi + 2h \omega v \sin \phi = 0 \end{aligned} \quad (3b)$$

여기서, x, y, z, t 는 평면직교좌표계와 시간, h 는 수심, u, v 는 직교좌표계에서의 유속, ρ 는 유체의 밀도, ϵ_{xx} 는 x 방향평면의 법선 와점성계수, ϵ_{yy} 는 y 방향평면의 법선 와점성계수, ϵ_{xy} 는 x 방향평면의 접선 와점성계수, ϵ_{yx} 는 y 방향평면의 접선 와점성계수, g 는 중력가속도, a 는 하상표고, n 은 Manning 계수, V_a 는 풍속, ζ 는 바람울력계수, Ψ 는 풍향, ω 는 지구자전각속도, ϕ 는 위도이다.

RMA2 모형의 지배방정식은 가중잔차 Galerkin 방법을 사용한 유한요소법으로 계산하고, 유한요소는 1차원 또는 2차원 사각형, 삼각형이 될 수 있으며, 곡선이 한 변으로 사용될 수 있다. 형상함수는 유속에 대해서 2차함수이며, 수심에 대해서는 1차함수이다. 공간에 대한 적분법은 Gaussian 적분법이 사용되었으며, 이에 대한 미분은 비선형 유한 차분 근사법에 의해 계산된다. 수치기법은 완전음해법으로서, 각 시간 단계에서의 비선형 연립방정식을 Newton-Raphson 반복계산법을 사용하여 해를 구한

다.

RMA4 모형은 2차원 수심 평균된 수질예측 유한요소 모형으로 1973년 WWDCE(Walla Walla District Corps of Engineers) 수자원 엔지니어인 Norton 등⁴⁾에 의하여 개발된 이후 수체에서의 오염물질 거동 해석에 적용되어 왔다. 이 모형은 연안지역과 저수지, 강, 만, 하구지역에서 용해 또는 부유된 물질의 혼합과 이동의 물리적 과정을 연구하는데 사용되며, 수질문제나 이송문제에 대한 구체적인 대책의 효율성을 분석하거나 기본적인 프로세스의 평가에 유용하게 이용되고 있다.

RMA4 모형은 농도가 연직방향으로 완전히 혼합된 비압축성 유체에서 보존성 물질의 3차원 이송확산방정식을 수평방향에 대하여 수심적분한 2차원 이송확산방정식을 지배방정식으로 사용하며, 식(4)와 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} & h \left(\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} \right) \\ & - h \left(D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \sigma - kC \right) = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, h 는 수심, C 는 오염물질의 농도, D_x, D_y 는 각각 x, y 방향의 난류확산계수, σ 는 오염물질의 국부적 생성·소멸항, k 는 생·화학적 반응에 의한 오염물질의 소멸계수이다. RMA4 모형의 수치기법으로 Galerkin 방법을 사용하며, RMA4 모형의 계산 결과는 SMS의 후처리 기능을 사용하여 여러 형태의 그림으로 표시하여 검토할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 모형 입력자료 및 모의조건

RMA2/RMA4 모형의 지형입력자료는 부산지방 국토관리청⁵⁾의 서낙동강 하천정비기본계획 하천측량자료를 사용하였다. 하상이 가장 깊은 곳의 표고는 El. -12.0 m이다. 수치모형에 사용한 평면 이차원 유한요소망은 삼각형 요소를 사용하였으며, 정삼각형에 가깝도록 결정하였다. 사용한 삼각형 유한요소의 개수는 5,299개이며, 격자점의 수는 12,070개이다.

수치모형의 상류 경계조건은 대저수문의 유입량과 지천 유입량으로 좌안측의 평강천 및 맥도강 배

수구역, 우안측에 대감천, 예안천, 주중천, 신어천 배수구역, 조만강 배수구역. 지사천 배수구역의 4개 대배수구역을 사용하였다. 또한 평강천과 맥도강의 유입구는 각각 3개의 배수암거로 나뉘어 유입되는 것으로 설정하였다. 대저수문의 유입량의 경우 서낙동강 수질개선종합대책에서 낙본N 지점의 목표 수질을 달성하기 위해 기준유량보다 20% 증대시켜 제시한 6 m³/s와 10, 30, 50 m³/s에 대해 수치모의 하였다. 유입지천들의 유입량의 경우는 Table 1에 제시된 유황분석 결과 중 평수량을 사용하였다. 하류 경계 수위로는 녹산수문의 상시만수위인 El. -0.3 m를 사용하였다.

서낙동강의 초기 BOD 농도는 Table 3에 제시된 10년간(1999년~2008년) 서낙동강 본류 수질측정망(서낙동강1, 서낙동강2, 서낙동강3, 신어천)들의 값을 평균하여 사용하였으며, 지천 유입수의 BOD 농도는 Table 2의 농도 값을 사용하다. 대감천의 BOD 농도 자료는 김 등⁶⁾이 김해시에 대해 수행한수질오염총량관리제도 이행평가 수질자료 중 2006년의 평균 측정값을 사용하였다. 대저수문을 통해 유입되는 낙동강 본류의 BOD 농도는 서낙동강과 가장 근접한 구포에서 측정한 10년간(1999년~2008년)의 평균값을 사용하였다.

실제 현상을 재현하기 위해서는 비정상 흐름으로 수치모의해야 하지만, RMA4 모형의 모의시간이 녹산수문 개폐에 시간 변화에 비해 상당히 길기 때문에 비정상성은 무시가능하다. 따라서 흐름을 정상상태로 모의하였으며, 대저수문의 유입량 변화와 각 입력자료를 고려하여 설정한 모의조건은 Table 4와 같다.

3.2. 민감도분석 및 매개변수 보정

RMA2 모형의 매개변수는 하상의 조도를 나타내는 Manning 계수, 난류교환계수, Peclet 수가 있다. 서낙동강에 알맞은 RMA2 모형의 매개변수를 결정하기 위해 Manning 계수, 난류교환계수, Peclet 수에 대한 민감도를 분석하였다.

신 등⁷⁾은 Manning 계수는 0.03, 난류교환계수는 20 Pa·s를 사용하였고, 이 등⁸⁾도 서낙동강 유역의 이차원 수질모델링에서 Manning 계수는 0.03, 난류교환계수는 20 Pa·s를 사용하였다. 민감도분석의 매개변수 기본값으로써 Manning 계수는 서낙동강

Table 4. Numerical simulation conditions

Sites	Case	Case1	Case2	Case3	Case4	Inflow BOD (mg/L)
		flow(m ³ /s)				
Daegeo gate inflow		6	10	30	50	2.74
Inflow in branch streams	Daegam	0.13				4.1
	Yeaan	0.06				3.1
	Jujoong	0.07				1.1
	Shineo	0.15				8.3
	Joman	1.10				6.5
	Geesa	0.26s				1.8
	Pyeong gang	0.34				7.7
	Macdo	0.22				6.5
Nok san gate	Flow	8.33	12.33	32.33	52.33	
	Elevation	El. -0.3 m				
Initial Conc. for WNR(mg/L)		6.55				
Run time(hr)		5	3	1	0.5	
Simulation Time(hr)		1,000	700	400	200	

하천정비기본계획에서 결정된 0.025를 사용하였고, RMA2 모형의 추천범위(E = 50~14,400 Pa·s, P = 15~40) 내에서 난류교환계수는 추천범위의 중간값인 1,000 Pa·s를 사용하였고, Peclet 수는 20을 사용하였다.

흐름의 변화가 크게 나타나는 세 지점을 선택하여 민감도분석을 실시하였으며, Fig. 2는 민감도 분석에 사용된 격자점의 위치를 표시한 것이다. 민감

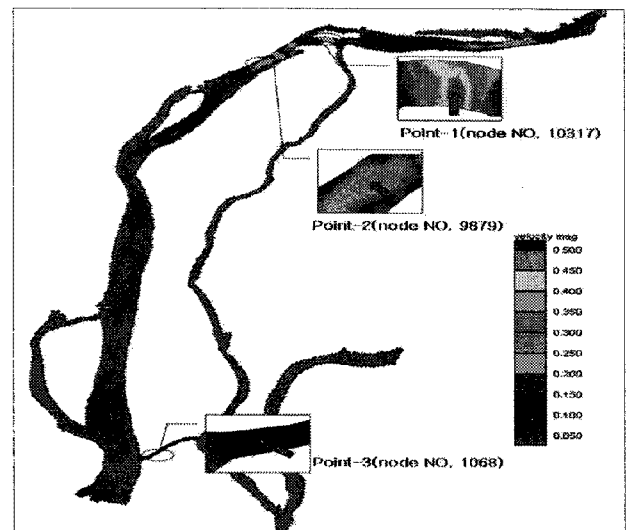


Fig. 2. Sensitivity analysis location.

도 분석에 사용된 격자점은 서낙동강 본류의 두 지점(Point-1, Point-2)과 서낙동강 본류와 평강천이 합류하는 곳의 한 지점(Point-3)을 사용하였다.

민감도분석에 사용한 흐름조건은 정상류 흐름으로 상류경계 조건은 본류의 유량 조건으로 50 m³/s를 사용하고, 지천유입유량은 Table 4에 제시된 각 지천들의 유량을 사용하였다. 하류경계조건은 수위 조건으로 El. -0.3 m를 사용하였다.

각 매개변수의 민감도 분석 범위로 Manning 계수는 0.02~0.1, 와점성계수는 1,000~15,000 Pa·s, Peclet 수는 5~45의 범위를 각각 다섯 단계로 변화시켜가며 분석하였으며, 분석대상이 아닌 매개변수는 RMA2 모형의 기본값을 사용하였다.

난류교환계수의 값은 모형의 안정성을 저해하지 않는 범위에서 가능한 한 작은 값을 부여하는데, 난류교환계수가 너무 크게 되면 안정한 해는 얻을 수 있지만 흐름 분포, 분리 그리고 와류 등을 적절히 모의하기 힘들기 때문이다. 반대로 난류교환계수가 너무 작을 경우에는 안정된 해를 얻기가 힘들어진다. 적절한 난류교환계수를 선정하는 것은 모형을 검증하는데 있어서 중요한 요소이다.

격자의 크기와 유속의 함수로써 난류교환계수를 표현할 수 있으며, 난류교환계수는 Peclet 수(P)에 의해 지배된다.

$$P = \frac{\rho U \Delta x}{E} \quad (5)$$

여기서 U 는 격자의 평균유속(m/s), Δx 는 흐름방향의 격자의 크기(m), E 는 난류교환계수(Pa·s)을 나타내며 통상적으로 SMS에서는 Peclet 수는 15 ~ 40의 범위에 있지만 20 이하의 값을 추천하고 있다.

조도계수는 수리량에 결정적인 영향을 줄 수 있지만, 이차원 수치모형에 있어서는 하천의 만곡에 의한 수위상승 등이 적절히 계산되므로 일차원 모형과는 다른 의미를 갖는다. RMA2 모형은 지역별로 Manning 계수와 난류교환계수의 입력이 가능하지만, 서낙동강 하천정비기본계획에 명시된 서낙동강 본류와 평강천, 맥도강 구간의 조도계수가 동일하여 서낙동강 전체구역에 일괄적으로 동일하게 적용하여 수치모의 하였다.

난류교환계수는 1,000, 3,000, 6,000, 10,000, 15,000 Pa·s, Peclet 수는 5, 15, 25, 35, 45, Manning

계수는 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.10에 대하여 민감도를 분석하였고, 계산한 흐름장의 유속, 수위 변화를 Fig. 3~5에 도시하였다.

난류교환계수와 Peclet 수의 민감도분석을 실시한 결과 난류교환계수는 흐름 저항을 표현하는 물리량이기 때문에 값이 클수록 수위는 증가하고 유속은 줄어드는 일반적인 형태를 나타내고 있으나, 1,000~3,000 사이에서의 유속은 민감한 반응을 보였다. 난류교환계수의 변화에 대한 모형의 결과값은 특별한 진동없는 일반적인 형태를 나타냄으로써 서낙동강에 적용할 난류교환계수는 모형에서 추천하는 난류교환계수의 범위 중 서낙동강 흐름특성에 적합한 범위내의 값인 1,000 Pa·s로 결정하였다.

Peclet 수의 경우는 주어진 범위 내에서 유속과 수위의 변화가 나타나지 않았다. 따라서, Peclet 수는 서낙동강에서 모형의 결과에 영향을 주지 않기 때문에 기본값으로 사용하는 20으로 결정하였다.

Manning 계수의 민감도분석을 실시한 결과 흐름 저항을 표현하는 물리량이기 때문에, 값이 클수록 수위는 증가하고 유속은 작아지는 일반적인 경향을

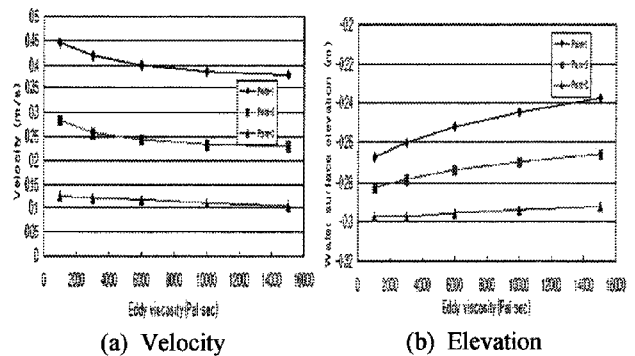


Fig. 3. Sensitivity analysis on turbulent exchange coefficient.

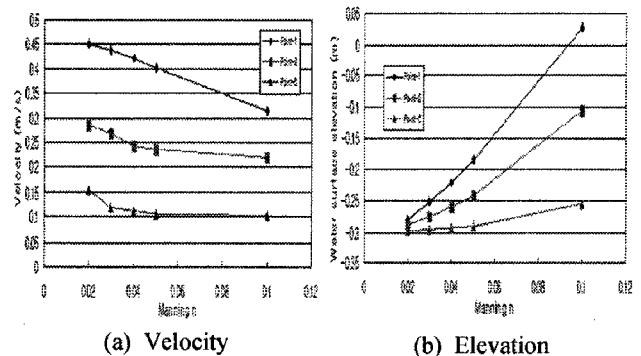


Fig. 4. Sensitivity analysis on Peclet number.

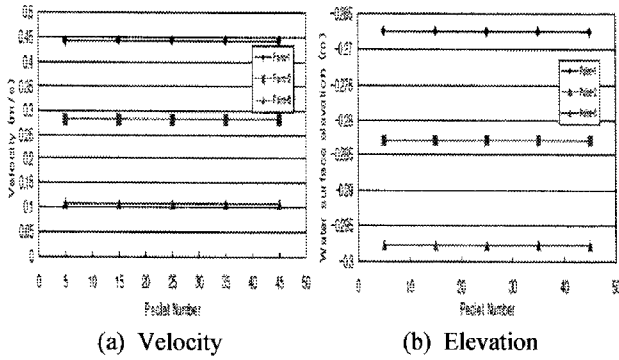


Fig. 5. Sensitivity analysis on Manning coefficient.

나타내고 있으나, Manning 계수를 0.10으로 과대 산정한 경우에는 수위가 급격히 증가하는 현상을 보였다. 따라서 Manning 계수를 과대산정하지 않는다면, 모의결과가 민감하게 반응하지 않으므로, 서낙동강 하천정비기본계획에서 제시한 Manning 계수 0.025를 사용하는 것이 무난할 것으로 판단하였다.

RMA4 모형의 매개변수는 확산계수가 있으며, 서낙동강에 적합한 확산계수를 결정하기 위해 민감도 분석을 수행하였다. 수치모의 정확도 향상을 위해 현장관측 결과를 사용하여 수치모형에서 적용할 확산계수를 결정하는 경우가 있다. 한강의 경우 김 등⁹⁾이 1994년 5월10일부터 5월 11일까지 한남대교에서 실측한 자료를 이용하여 모형을 검정한 결과 확산계수는 x, y 방향(흐름방향 및 흐름연직방향) 모두 $0.75 \text{ m}^2/\text{s}$ 로 나타났으며, 수질항목의 자정계수로서 COD 제거계수를 0.02로 사용하였다. 서¹⁰⁾는 광양만에 적용된 값으로 $10 \sim 100 \text{ m}^2/\text{s}$ 내에서 반복계산 후 계산결과가 실측치에 가장 가까운 값을 선정한 바 있다. 정과 박¹¹⁾은 동천과 이사천 합류점으로부터 순천만까지 RMA4 모형을 이용하여 하천의 흐름에 따른 부유물질의 이송확산을 모의하였고, 확산계수는 평균유속과 조류를 고려하여 x, y 방향에 대해 각각 $0.97, 0.58 \text{ m}^2/\text{s}$ 를 사용하였다. 또한 이 등⁸⁾은 SMS를 이용한 서낙동강의 이차원 흐름 및 확산거동 연구를 통해 서낙동강 본류에서의 확산계수를 $0.05 \text{ m}^2/\text{s}$ 로 설정하고 오염물질의 이송확산을 예측한 바 있다.

서낙동강에서 실측을 통해 얻은 확산계수가 없는 관계로 선행연구들에서 사용한 값을 토대로 하였으며, 일반적인 하천과 하구와 인접해 있는 하천에서의 확산계수 값을 기초로 하여 RMA4 모형에 사용

할 확산계수의 개략적인 범위를 설정하고, 민감도 분석은 확산계수 변화에 따른 모형의 결과를 통해 분석하였다. 선행연구를 통해 설정한 서낙동강에 적용 가능한 확산계수의 범위는 $0.6, 1, 5, 10, 10^2, 10^3 \text{ m}^2/\text{s}$ 으로 서낙동강에서는 $0.5 \text{ m}^2/\text{s}$ 이하의 확산계수는 RMA4 모형이 발산하였다. RMA4 모형의 확산계수에 대한 민감도분석에 사용한 RMA2 모형의 흐름조건은 RMA2 모형의 민감도 분석과 동일한 경계조건을 사용하였고, 난류교환계수는 $1,000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, Peclet 수는 20, Manning 계수는 0.025를 사용하였다.

Fig. 6(a)~(f)는 확산계수 변화에 따른 서낙동강의 농도분포를 도시한 것으로 확산계수가 커짐에

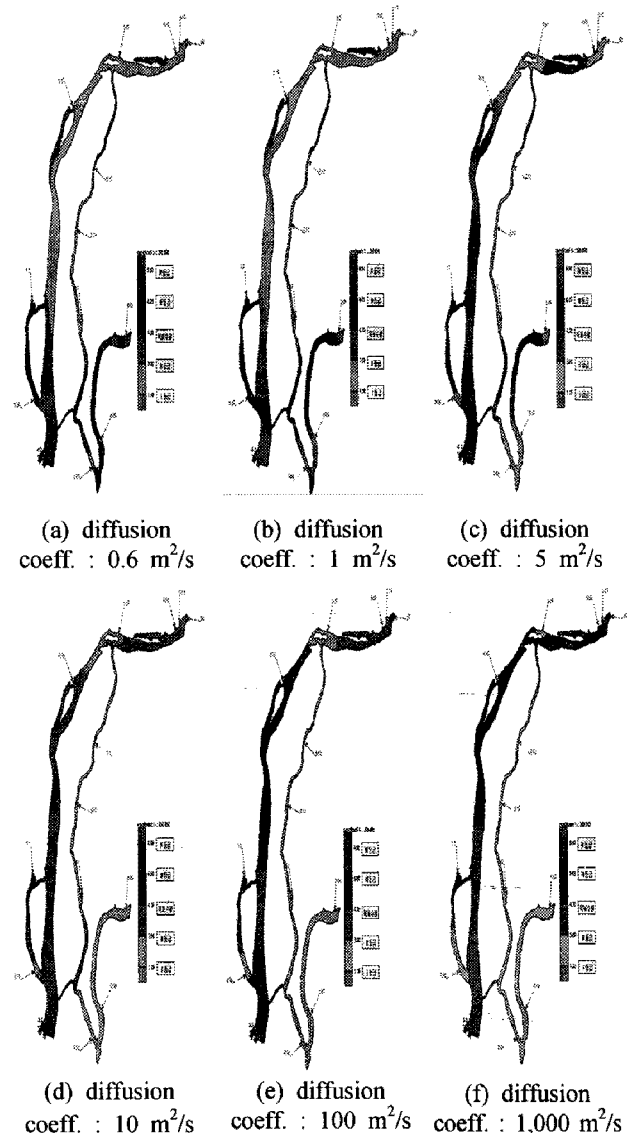


Fig. 6. Sensitivity analysis on diffusion coefficient in BOD.

따라 오염물질의 이동거리가 증가하고, 농도분포의 공간확산 규모가 더 커지는 것을 알 수 있었다.

그러므로 확산계수는 완전히 혼합된 거리에 큰 영향을 주고 있음을 확인할 수 있었다. 서낙동강에 적용할 확산계수의 민감도분석 결과, 일반적으로 하구나 연안과 같이 난류의 영향이 큰 지역에서 사용하였던 $10 \text{ m}^2/\text{s}$ 이상의 확산계수는 흐름이 거의 발생하지 않는 평강천과 맥도강에서 서서히 확산을 발생시켜 수질이 개선되는 양상을 보였고, $100 \text{ m}^2/\text{s}$ 이상의 확산계수에 의해서는 신어천과 조만강에서 유입되는 BOD 농도를 과도하게 확산시켜 서낙동강 본류의 BOD 농도변화를 적절히 나타내지 못하였다. $5 \text{ m}^2/\text{s}$ 의 경우 지천들의 BOD 유입에 따른 서낙동강 본류의 BOD 농도 분포를 적절히 나타내지 못하는 것으로 판단된다. $0.6 \text{ m}^2/\text{s}$ 의 경우 수치모의 결과가 발산되는 $0.5 \text{ m}^2/\text{s}$ 근처의 확산계수로써 $1.0 \text{ m}^2/\text{s}$ 와 유사한 결과를 나타내고는 있으나, 수치모의 시 적용하기에는 부적합할 것으로 판단하였다. 일반적인 하천에서는 $1 \text{ m}^2/\text{s}$ 이하의 확산계수를 가지는 것으로 추정되며, 이 연구에는 $1 \text{ m}^2/\text{s}$ 를 RMA4 모형의 확산계수로 사용하였다.

3.3. 흐름장 및 수질변화 예측

3.3.1. 흐름 모의 결과분석

Table 4의 모의조건에 대하여 정상류 흐름을 수

치모의하였다. 서낙동강 흐름예측에서 서낙동강 상류 좌안으로 합류하는 평강천 유입부의 경우 Case-1~3의 모의조건에서는 평강천 상류에서 서낙동강으로 흐름이 발생하였으며, 대저수문을 통한 유입량이 $50 \text{ m}^3/\text{s}$ (Case-4) 정도가 되면 서낙동강에서 평강천 상류쪽으로 미세한 흐름이 발생함을 알 수 있었다(Fig. 7). 이런 현상은 대저수문 유입유량 증가로 인한 영향이 평강천 흐름변화에는 그다지 영향을 주지 못하는 것으로 판단되며, 비록 평강천 하류단에서 서낙동강 본류쪽으로 흐름 발생한다하더라도, 서낙동강 본류 유량을 평강천 상류쪽으로 원활하게 유입시키지 못한다면 평강천에서 수문운영에 의한 수질개선 효과는 매우 낮은 것으로 판단되었다. 맥도강의 경우는 수문을 통한 유입량이 있음에도 불구하고 흐름이 거의 발생하지 않았으며, 서낙동강 본류에서 유속이 가장 빠른 곳은 김해교 부근으로 각 모의 조건별로는 0.074 m/s , 0.093 m/s , 0.309 m/s , 0.505 m/s 의 유속을 나타냈다(Fig. 8).

3.3.2. 수질 모의 결과분석

Table 4의 BOD 유입농도를 사용하여 서낙동강에서의 BOD 농도변화를 예측하였다. 또한, 각 모의조건별 평면 이차원 BOD 농도를 수치모의할 때 사용할 계산시간 간격과 수치모의시간(Table 4)을 설정하였으며, 각 모의조건별 유속장 예측결과를 바탕

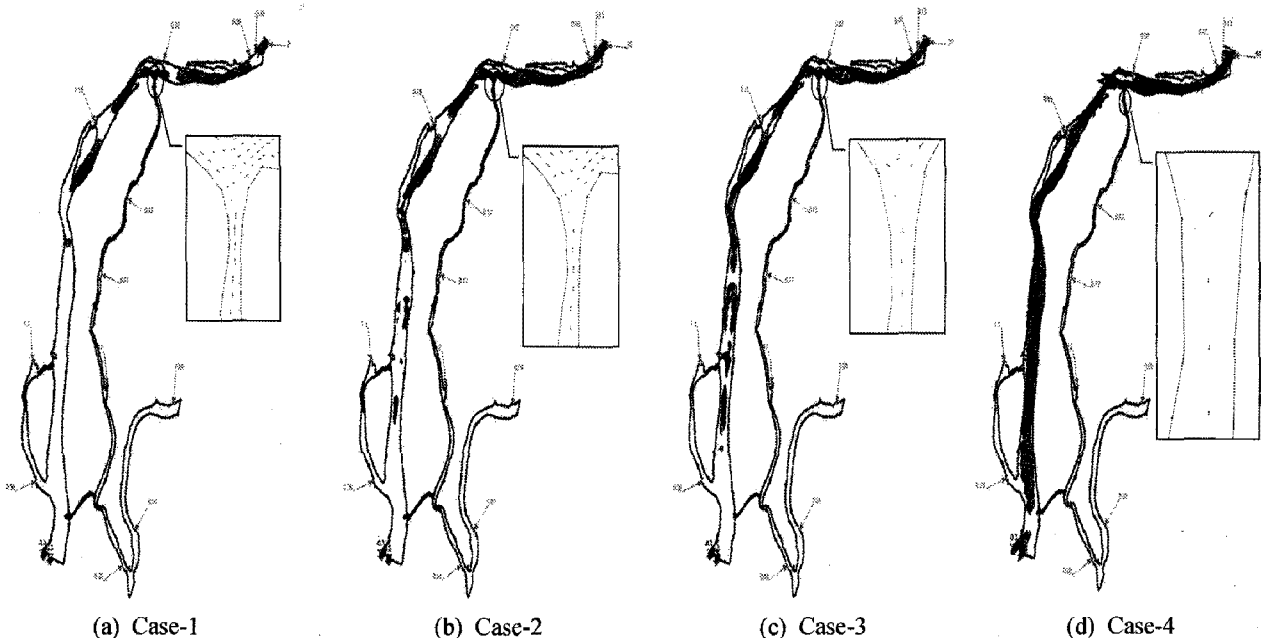


Fig. 7. Velocity vector map.

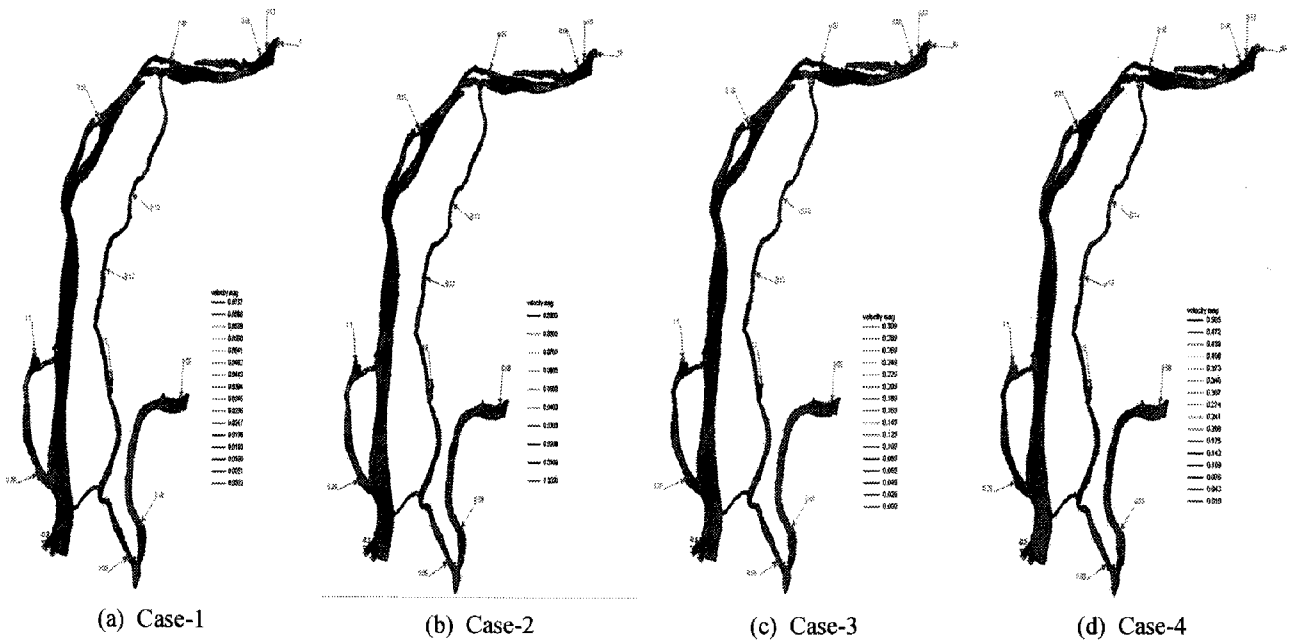


Fig. 8. Velocity contour map.

으로 유속이 느릴수록 계산시간 간격과 수치모의시간을 길게 설정하였다. Fig. 9는 각 모의조건별로 나타난 서낙동강에서의 BOD 농도분포를 도시한 것이다.

RMA4 모형에 적용한 BOD 초기농도는 서낙동강 본류 수질측정망들의 BOD 농도 평균치인 6.55 mg/L를 사용하였고, BOD 농도분포 예측결과는 하상퇴적물로부터의 용출을 고려하지 않고, 오염물질

인 BOD를 보존성 물질로 가정하여 계산한 결과이다.

Fig. 9(a)는 Case-1에 대한 BOD 농도분포를 나타낸 것으로 낙본N 지점의 목표수질(BOD 4.3 mg/L 이하)을 달성하는데 30일의 시간이 필요함을 알 수 있었다. 이는 유입유량이 6 m³/s로 서낙동강 수질개선 종합대책에서 수질개선을 위해 설정한 대저수문 유입유량으로써, 이 연구의 모의조건에 의한 분석결

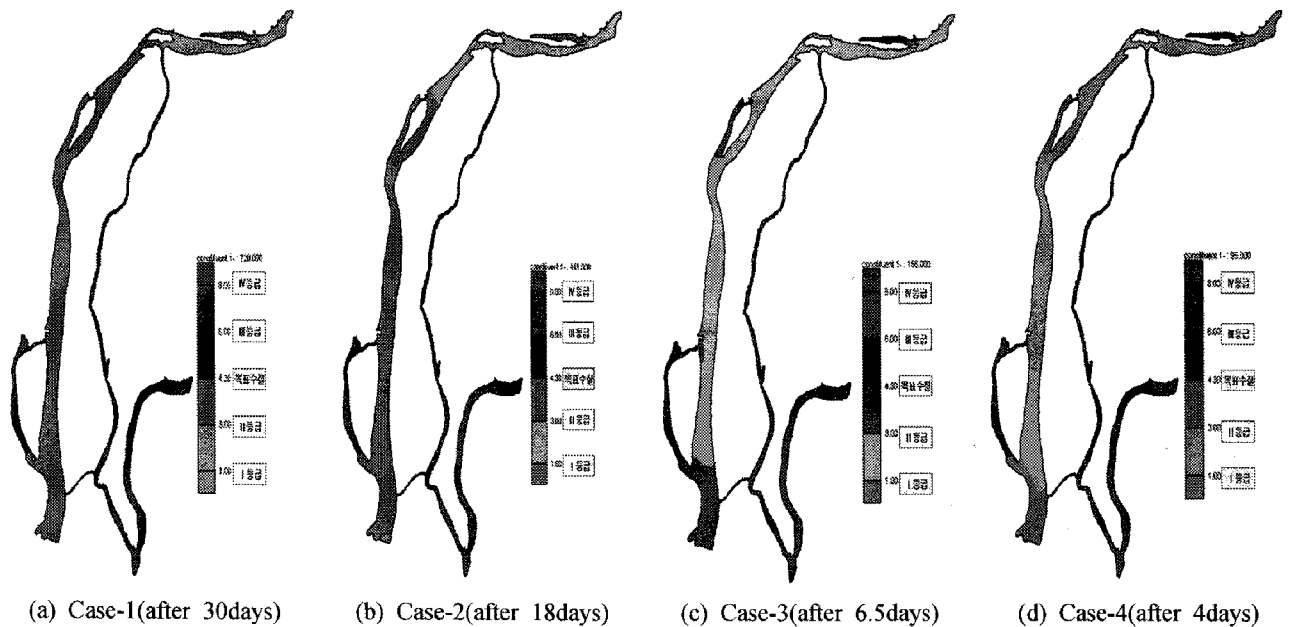


Fig. 9. Result of BOD concentration distribution (BOD, mg/L).

과 현실적 수질개선효과를 얻기에는 상당히 긴 시간이 필요할 것으로 예측되었다. 또한 Case-2의 경우도 분석결과 목표수질을 달성하는데 18일 이상의 시간이 필요한 것으로 나타났다(Fig. 9(b)).

Case-3과 Case-4의 BOD 농도분포 분석결과 6.5일과 4일의 시간이 필요함을 알 수 있었고(Fig. 9(c)~11(d)), 이는 현재 대저수문과 녹산수문은 조위의 영향을 고려하여 5물~11물에 최대 7일 정도 수문을 개방하는 것을 고려할 때 현실적인 수문운영 개방 상황으로써도 서낙동강의 목표수질을 달성할 수 있는 것으로 예측되었다. 그리고 목표수질을 적정 시간에 달성하기 위해서는 $30 \text{ m}^3/\text{s}$ 이상의 대저수문 유입유량이 필요한 것으로 나타났다.

각 모의 조건별 평강천과 맥도강의 수질개선 효과는 거의 없었으며, 특히 맥도강의 경우 흐름이 거의 발생하지 않아 실질적인 BOD 농도분포를 고려하기에 어려운 상황이며, 맥도강의 수질개선 효과를 위해서는 수체교환방식으로 수문개방 일정을 고려한 맥도배수펌프장과 신포배수펌프장의 가동을 검토해야 할 것으로 판단된다.

3.4. 비교 및 고찰

RMA2 흐름 모형에 대한 민감도분석 결과, 난류교환계수가 클수록 수위는 증가하고 유속은 줄어드는 일반적인 형태를 나타내고 있으나, 1,000~3,000 사이에서는 유속이 민감한 반응을 보였다. 난류교환계수의 변화에 대한 모형의 결과값들은 특별한 진동없이 일반적인 형태를 보였다. 서낙동강의 경우 Peclet 수의 경우는 수치모형의 결과에 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. Manning 계수 값이 클수록 수위는 증가하고 유속은 작아지는 일반적인 경향을 보였으며, Manning 계수를 과대산정하지 않는다면 수치해에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 예측되었다. 따라서, 이 연구에서 난류교환계수는 $1,000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, Peclet 수는 20, Manning 계수는 0.025를 사용하였다.

서낙동강에 적합한 RMA4 모형의 확산계수를 결정하기 위해 민감도분석을 수행하였다. 선행연구를 통해 설정한 서낙동강에 적용 가능한 확산계수의 범위는 0.6, 1, 5, 10, 10^2 , $10^3 \text{ m}^2/\text{s}$ 으로 서낙동강에서는 $0.5 \text{ m}^2/\text{s}$ 이하의 확산계수는 RMA4 모형이 발산하였다. 확산계수가 커짐에 따라 오염물질의 이동

거리가 증가하고, 농도분포의 공간확산 규모가 더 커지는 것을 알 수 있었다. 일반적인 하천에서는 $1 \text{ m}^2/\text{s}$ 이하의 확산계수를 가지는 것으로 추정되며, 이 연구에는 $1.0 \text{ m}^2/\text{s}$ 를 RMA4 모형의 확산계수로 사용하였다.

Case-1($6 \text{ m}^3/\text{s}$ 유입)의 경우 낙본N 지점의 목표수질(BOD 4.3 mg/L 이하)을 달성하는데 30일의 시간이 필요한 것으로 예측되었다. 유입유량 $6 \text{ m}^3/\text{s}$ 는 서낙동강 수질개선종합대책에서 수질개선을 위해 설정한 대저수문 유입유량으로써 현실적 수문개방의 상황으로는 수질개선효과를 얻을 수 없을 만큼 많은 시간이 필요한 것으로 나타났다. 또한 Case-2($10 \text{ m}^3/\text{s}$ 유입)의 경우도 분석결과 목표수질을 달성하는데 18일 이상의 시간이 필요한 것으로 나타났다. Case-3($30 \text{ m}^3/\text{s}$ 유입)과 Case-4($50 \text{ m}^3/\text{s}$ 유입)의 BOD 농도분포 분석결과 6.5일과 4일의 시간이 필요함을 알 수 있었고, 이는 현재 대저수문과 녹산수문은 조위의 영향을 고려하여 5물~11물에 최대 7일 정도 수문을 개방하는 것을 고려할 때 현실적인 수문운영 개방상황으로써도 서낙동강의 목표수질을 달성할 수 있는 것으로 예측되었다. 그리고 목표수질을 적정 시간에 달성하기 위해서는 $30 \text{ m}^3/\text{s}$ 이상의 대저수문 유입유량이 필요한 것으로 나타났다. 각 모의 조건별 평강천과 맥도강의 수질개선 효과는 거의 없었으며, 특히 맥도강의 경우 흐름이 거의 발생하지 않아 실질적인 BOD 농도분포를 고려하기에 어려운 상황이며, 맥도강의 수질개선 효과를 위해서는 수체교환방식으로 수문개방 일정을 고려한 맥도배수펌프장과 신포배수펌프장의 가동을 검토해야 할 것으로 판단된다.

4. 결 론

서낙동강의 목표수질(낙본N 지점 BOD: 4.3 mg/L 이하)을 달성하기 위한 서낙동강의 수질개선대책 중 '수문연계운동을 통한 정체수역해소' 방안에 대한 정량적인 검토를 목적으로 수행하였다. 서낙동강의 수질변화를 예측하기 위해서 서낙동강의 수리·수문 및 수질 현황을 조사·분석하였다. 서낙동강에 적합한 평면 이차원 흐름 및 수질 예측모형의 매개변수를 민감도 분석을 통해 결정하였고, 수문운영에 대한 각 모의조건을 설정하여 서낙동강의

BOD 농도분포를 예측하였다. BOD 농도분포 예측 결과는 하상퇴적물로부터의 용출을 고려하지 않고, 오염물질인 BOD를 보존성 물질로 가정하여 계산한 결과로서, 실제 현상과는 다소 차이가 있을 것으로 판단된다.

평면 이차원 흐름 분석결과, Case-1~3의 모의조건에서는 평강천 상류에서 서낙동강쪽으로 흐름이 발생하였으며, 대저수문을 통한 유입량이 50 m³/s (Case-4) 정도가 되면 서낙동강에서 평강천 상류쪽으로 미세한 흐름이 발생함을 알 수 있었다. 이런 현상은 대저수문 유입유량 증가로 인한 영향이 평강천 흐름변화에는 그다지 영향을 주지 못하는 것으로 판단되며, 비록 평강천 하류단에서 서낙동강 본류쪽으로 흐름 발생한다하더라도, 서낙동강 본류의 흐름을 평강천 상류쪽으로 원활하게 유입시키지 못한다면 평강천에서 수문운영에 의한 수질개선 효과는 매우 낮을 것으로 판단되었다. 맥도강의 경우는 수문을 통한 유입량이 있음에도 불구하고 흐름이 거의 발생하지 않았으며, 서낙동강 본류에서 유속이 가장 빠른 곳은 김해교 부근으로 나타났다.

각 모의조건에 의한 서낙동강의 수질변화예측 결과 현재 대저수문과 녹산수문은 조위의 영향을 고려하여 5물~11물에 최대 7일 정도 수문을 개방하므로 대저수문을 통해 30 m³/s 이상을 서낙동강으로 유입한다면 현실적인 수문운영 개방상황으로도 서낙동강의 목표수질을 달성할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 평강천과 맥도강의 경우 대저수문을 통해 낙동강의 물을 유입시키더라도 수질개선 효과는 미미하였으며, 특히 맥도강의 경우 흐름이 거의 발생하지 않아 실질적인 BOD 농도분포를 고려하기에 어려운 상황이다. 맥도강의 수질개선 효과를 위해서는 수체교환방식으로 수문개방 일정을 고려한 맥도배수펌프장과 신포배수펌프장의 가동을 검토해야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 및 한국건설교통기술평가원 건설핵심기술연구개발사업의 연구비지원(06건설핵심B01)에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

- 1) 서낙동강유역관계기관합동, 2005, 철새들의 낙원 서낙동강 수질개선 종합대책.
- 2) 환경관리공단, 2001, 서낙동강 수질개선 타당성조사 보고서.
- 3) 이남주, 김영도, 권재현, 신찬기, 2007, 수문운영에 따른 서낙동강 수질변화에 관한 이차원 수치모의, 상하수도학회지, 21(1), 101-112.
- 4) Norton, W. R., I. P. King and G. T. Orlob, 1973, A finite element model for lower granite reservoir. US Army Corps of Engineers, Walla Walla district, Walla Walla Washington.
- 5) 부산지방국토관리청, 2001, 서낙동강하천정비기본계획 - 서낙동강(보완), 평강천, 맥도강.
- 6) 김영도, 권재현, 박재현, 2007, 서낙동강 대저수문과 녹산수문 운영시 유량 및 수질 모니터링, 06-2-30-33, 경남지역환경기술개발센터.
- 7) 신현석, 서규우, 신사철, 박무중, 2004, 낙동강 하천 수리특성 분석 및 수리모의 예측기법 개발(1차년도), 부산대학교 생산기술연구소, 168-174.
- 8) 이남주, 박재현, 김영도, 류시완, 2006, SMS를 이용한 서낙동강의 이차원 흐름 및 확산거동 연구, 한국물환경학회·대한상하수도학회 공동출판 학술발표회 논문집, 1127-1136.
- 9) 김형일, 이종설, 허준행, 조원철, 1998, 한강하류부에서의 오염물질의 거동특성 연구, 한국수자원학회 논문집, 31(1), 85-93.
- 10) 서상원, 1998, 수심적분 2차원 유사이동모형에 관계된 인자들의 민감도 분석에 관한 연구, 석사학위논문, 토목공학과, 명지대학교, 서울.
- 11) 정용태, 박원길, 2000, RMA4 모형에 의한 동천하류부에서의 현탁물질확산특성 연구, 한국환경관리학회지, 6(3), 315-322.