

수문운영에 따른 서낙동강 수질변화에 관한 이차원 수치모의

Two-dimensional Numerical Modeling of Water Quality Variation by Gates Operation in the Seonakdong River

이남주¹ · 김영도^{2,*} · 권재현³ · 신찬기⁴

Lee, Namjoo¹ · Kim, Young Do^{2,*} · Kwon, Jae Hyun³ · Shin, Chan Ki⁴

1 경성대학교 건설환경공학부

2 인제대학교 환경공학부

3 인제대학교 환경공학부

4 국립환경과학원 낙동강물환경연구소

(2006년 12월 11일 논문 접수; 2006년 12월 28일 최종 수정논문 채택)

Abstract

This study has used RMA2 model and RMA4 model, which are depth-averaged two-dimensional flow and water-quality prediction models, to analyze the variation of the water-quality by the gates operation in the Seonakdong River. Sensitivity analysis is performed to get the Manning coefficient and the coefficient of eddy viscosity for RMA2 model, and to get the diffusion coefficient for RMA4 model. Since the numerical simulation using RMA2 and RMA4 models did not consider tributary pollutant load except for that of Joman River, it could make a little difference from the natural phenomenon. Nevertheless, the numerical simulation shows that the discharge of 30m³/s, which is the continuous inflow from the Daedong-gate, can make it possible to achieve the target water-quality (BOD 4.3mg/L) of Nakbon-N watershed about 10 days later if the Daejeo-gate could remain opened in connection with the Noksan-gate operation.

Key words: Seonakdong River, Daejeo-gate, Noksan-gate, RMA2, RMA4, sensitivity analysis

주제어: 서낙동강, 대저수문, 녹산수문, RMA2, RMA4, 민감도분석

1. 서 론

서낙동강은 상류에는 대저수문이, 하류에는 녹산수문이 위치하고 있어 수문에 의하여 조절되는 하천형 저수지이다. 서낙동강 유역은 좌안에 평강천, 맥

도강, 우안에 대감천, 예안천, 주중천, 신어천, 지사천, 조만강 유역으로 구성되어 있으며, 행정구역상 부산광역시 강서구와 경상남도 김해시에 걸쳐 있다. 서낙동강은 파천인 평강천, 맥도강과 지류인 조만강의 중하류구간까지 담수지를 형성하여 평상시에는 광활한 김해평야의 주요 농업용수 공급원으로 이용되

*Corresponding author Tel: +82-55-320-3252, FAX: +82-55-334-7092, E-mail: ydkim@inje.ac.kr (Kim, Y.D.)

고, 홍수 때에는 거대한 유수지의 역할을 하고 있다.

서낙동강은 농업용수로 사용하기 위해 설치한 대저수문 및 녹산수문에 의해 1년 중 대부분의 기간 동안 수위가 정체되어 있으며, 특히 농업용수의 사용량에 따라 수위의 변화가 매우 심하며, 강우가 집중되는 하계(6~9월)에 일시적인 방류에 의하여 수체의 교환이 한시적으로 일어나는 등 전형적인 하천형 저수지의 특성을 갖고 있다.

서낙동강의 수질이 저하되는 중요한 원인은 대저수문 및 녹산수문에 의하여 하도 내에 수위가 장기간 정체됨에 따라 자정능력을 잃어가기 때문이다. 수위가 정체되면 수역 내 유속이 저하되며, 퇴적특성에 직접적인 영향을 주게 되고, 하상에 퇴적되는 유사의 입경에 영향을 미치게 된다. 서낙동강의 경우, 대저수문이 열리는 동안만 낙동강 본류로부터 부유사 유입이 이루어지며, 이때 유입되는 부유사는 세류사에 가까운 미립토사가 유입되며 유입량도 상당히 적다. 서낙동강 유입 토사는 지천으로부터 유입되는 양이 대부분을 차지하며, 하상재료는 실트질이 많은 점토질 토사가 주를 이루고 있다.

서낙동강 유역 내에는 점오염원 및 비점오염원이 널리 분포하고 있다. 서낙동강으로 유입되는 주요 점오염원으로는 분뇨처리장, 하수처리장 등을 들 수 있다. 그 외에도 농업 및 축산활동에 의한 비점오염원이나, 내수면 양식어업에 의한 오염원의 유입, 유역 내에 위치한 공장에서 배출되는 중금속을 포함한 여러 종류의 오염원 등이 서낙동강 유역으로 유입되고 있다. 정체된 수역내로 점, 비점오염원들에 의한 과도한 영양염류의 유입은 수질악화를 증대시켰고, 특히 흐름이 없는 맥도강은 자정능력을 완전히 상실한 상황이다.

서낙동강 수질 문제는 자연유하하지 않는 하천형 저수지의 공통적 특성으로, 이러한 문제를 해결하기 위한 가장 기본적 방안은 수문조작을 통하여 수역 내의 유속을 적절히 조절하고, 이를 통하여 수질개선 효과를 확보하는 것이다. 현재 녹산 및 대저수문의 조절은 주로 농업용수 확보 차원에서 이루어지는 것으로 체계적인 계획이 수립되어 있지 않고 있다. 심지어 홍수기나 갈수기에도 특별한 수문조작에 관한 계획이 없는 실정이다. 특히 4월부터 10월까지의 수문조절을 거의 하지 않고 있어 과도한 영양염류의 유

입, 긴 체류시간으로 인하여 녹조류가 번성하는 것으로 조사되고 있다. 지난 몇 년간 일부 수문조절을 통하여 수질개선이 시도된 적은 있으나 과학적 근거가 축적되지 못하고 있는 실정이다. 따라서 서낙동강의 실질적 수질개선을 이끌어 낼 수 있는 과학적 근거에 의한 수문운영방안을 연구하는 것이 필요한 것으로 판단된다.

본 연구는 서낙동강의 흐름을 조절하는 대저수문과 녹산수문의 유수 소통능력을 수리학적으로 평가하고, 평면 이차원 흐름 및 수질 예측 수치모형인 RMA2 모형과 RMA4 모형을 사용하여 서낙동강의 수질 개선을 위한 적절한 유량 및 수문 연계운영 방안을 모색하고자 수행하였다.

2. 연구방법

2.1. 서낙동강 현황 조사

2.1.1. 수리수문 현황

서낙동강 유역은 행정구역으로는 부산광역시 강서구와 경상남도 김해시의 일부를 포함하고 있으며, 유역면적은 303.1km², 유로연장은 서낙동강이 26.8km이다. 유역의 중앙부와 남동부는 서낙동강을 중심으로 넓은 삼각주 충적평야가 발달하였다. 서낙동강 수계에는 서낙동강, 평강천 및 맥도강 등 국가하천 3개 하천, 조만강 등 15개의 지방 2급하천을 포함하고 있으며, 지정연장은 국가하천 39.45km, 지방 2급하천

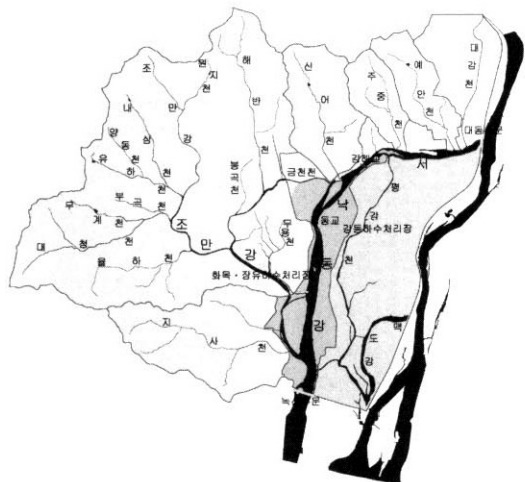


Fig. 1. 서낙동강 유역도(서낙동강유역관계기관합동, 2005).

82.90km이다(부산지방국토관리청, 2001).

서낙동강 유역 내에는 장기 유량 관측자료가 없기 때문에 다른 유역의 자료를 사용하여 다음 식과 같은 비유량법으로 유황분석을 수행할 수밖에 없는 상황이다.

$$Q' = Q(A' / A) \quad (1)$$

여기서, Q' 은 대상 하천의 유황(m^3/s), Q 는 인접 하천의 유황, A' 은 대상 하천의 유역면적(km^2), A 는 인접 하천의 유역면적이다. 부산지방국토관리청(2001)은 낙동강 상류의 안동댐 지점의 유황자료를 사용하여 서낙동강, 평강천, 맥도강의 유황분석을 수행하였으나, 본 연구에서는 서낙동강과 인접한 양산천 유역(유역코드: 202204)의 유황분석 결과(국가수자원관리종합정보시스템, WAMIS; <http://www.wamis.go.kr>)를 사용하여 각 지천하구에서의 유황분석을 수행하였다. 안동댐의 자료를 사용할 경우 풍수량은 13.3%, 평수량은 15.6%, 저수량은 12.9%, 갈

수량은 2.5% 작게 추정된다. Table 1은 각 하천 하구에서의 유황분석 결과를 정리한 것이며, 서낙동강의 하천유역면적은 2004. 7. 20일자 한국하천일람자료를 사용하였다.

부산시 강서구 대저1동에 위치한 대저수문의 낙동강 본류수 취수용량은 $108m^3/s$ 이며, 녹산수문은 제1수문과 제2수문으로 구성되어 있고, 배수능력은 각각 $970m^3/s$ 와 $670m^3/s$ 이며, 각 수문의 세부 제원은 Table 2와 같다.

서낙동강의 하상은 완만하여 경사는 $1/24,000 \sim 1/30,000$ 정도이며, 하상재료는 주로 점토질 이토로 구성되어 있다. Fig. 2는 부산지방국토관리청(2001)의 자료를 사용하여 하상고를 구한 것으로 평면 이차원 수치모형의 입력자료로 사용하였다.

2.1.2. 수질현황

서낙동강 본류 및 지류, 낙동강 본류의 연도별 BOD 변화를 지점별로 정리하면 Table 3과 같다. 2004년도의 서낙동강 본류의 연평균 BOD는 농업용

Table 1. 서낙동강 및 지류의 현황

구분	유역면적(km^2)	유황(m^3/s)			
		풍수량	평수량	저수량	갈수량
예안천	11.09	0.19	0.09	0.05	0.02
주중천	8.62	0.14	0.07	0.04	0.01
신어천	18.39	0.31	0.15	0.08	0.03
조만강	175.36	2.95	1.46	0.75	0.25
지사천	30.48	0.51	0.25	0.13	0.04
평강천	34.61	0.58	0.29	0.15	0.05
서낙동강	285.08	4.79	2.37	1.22	0.41
안동댐	1,584.0	23.10	11.10	5.90	2.20
양산천	245.7	4.13	2.04	1.05	0.35

Table 2. 수문의 주요 제원

구분	단위	녹산수문		대저수문	
		제1수문	제2수문	갑문	취수문
규모	$B \times h \times \text{련}$	$10.0 \times 4.0 \times 10$	$12.0 \times 6.0 \times 6$	$8 \times 6.5 \times 1$	$5 \times 4.5 \times 2$
Sill표고	El.m	-2.50	-3.50	-3.00	-3.00
계획홍수위	El.m	1.13	1.13	-	-
상시만수위	El.m	-0.30	-0.30	-0.30	-0.30
인양구조	-	Roller Gate	Roller Gate	-	-
운전속도	m/min	0.5	0.5	-	-
설치연도	년	1934	1992	-	-

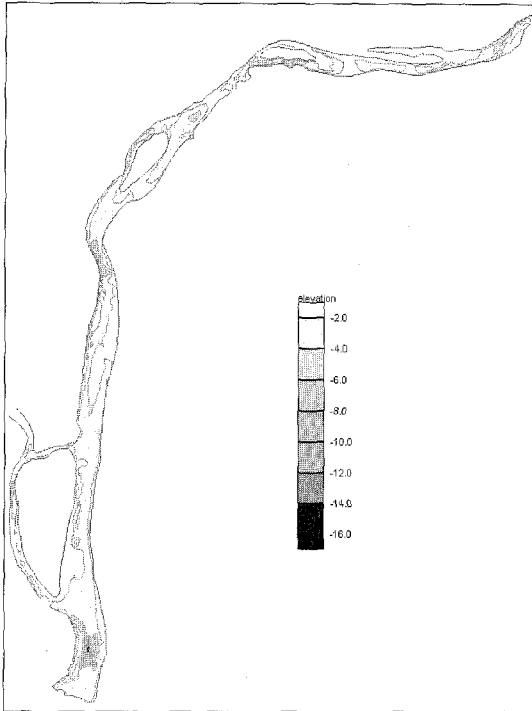


Fig. 2. 서낙동강 하상고.

수기준(BOD 8mg/L 이하)을 만족하고 있으며, BOD를 기준으로 본 서낙동강 본류의 연평균 수질은 1995년 이후 개선되고는 있으나 낙본 N 지점(녹산수문)

의 목표수질인 BOD 4.3mg/L를 대부분 초과하고 있는 상황이다.

유입지천의 수질환경기준 달성현황(2004년)을 보면 서낙동강으로 유입되는 조만강 등 유입지천의 연평균수질은 BOD 기준으로 IV등급 이내가 6개소, IV등급을 초과하는 지점이 1개소에 불과하지만, 낙본 N지점의 목표수질인 BOD 4.3mg/L와 비교하면 Table 4에서 보는 바와 같이 신어천, 조만강, 평강천, 맥도강 등 4개 측정지점에서 초과하고 있다(서낙동강유역관계기관합동, 2005).

2.2. 평면 이차원 수치모형의 기본 이론

하천 및 저수지에서 수면곡선을 계산하기 위한 HEC-RAS와 같은 일차원 수치모의는 사용이 간편하고 지형자료의 준비가 용이하여 널리 사용되지만, 평면적인 유황 및 수질변화를 모의할 필요성이 있는 경우에는 수심적분 이차원 수치모형이 필요하다. 하천에서의 흐름거동을 이차원적으로 해석하는 데에는 유한요소법을 사용하는 상용모형인 SMS(Surface Water Modeling System)가 유한차분법에 비해 경계처리가 용이한 장점을 가지고 있어 실무에 많이 적용되고 있다. SMS의 RMA2 모형과 RMA4 모형은 시화방조제의 시화 및 탄도 배수갑문 연계운영에 따른 호수내의

Table 3. 서낙동강 본류의 수질 현황(BOD, 단위: mg/L)

연도	서낙동강				조만강	신어천	낙동강
	서낙동강 1	신어천	서낙동강 2	서낙동강 4	서낙동강 3	신어천 2	구포
1992	5.5		6.0		6.2	25.9	3.5
1993	6.5	36.3	6.5		8.2	25.8	3.9
1994	6.0	52.1	7.5		8.6	32.0	4.6
1995	7.5	60.8	8.8		10.1	40.3	4.7
1996	6.6	54.7	8.3		8.2	57.2	4.4
1997	8.2	40.9	8.3		8.0	43.5	3.8
1998	6.8	27.6	9.4		6.1	31.5	3.2
1999	5.0	25.7	7.0		5.9	30.0	3.1
2000	5.4	16.8	6.6		8.5	29.2	2.9
2001	4.4	12.1	4.6		5.6	28.2	3.2
2002	4.3	11.1	4.5		5.5	40.9	2.5
2003	3.4	9.0	3.8	3.7*	5.6	16.4	2.2
2004	5.4	12.2	6.7	4.5*	7.1	10.5	2.8
2005	4.5	10.1	4.6	6.7*	7.1	10.8	2.9
위치	김해교	시만교	강동교	녹산수문	조만교	초선교	구포

비고: 상기 자료는 환경부의 WEIS(물환경정보시스템) 자료를 사용함.

*표시자료는 서낙동강유역관계기관합동(2005)1)에서 발췌함.

Table 4. 유입지천의 수질환경기준 달성현황(서낙동강유역관계기관합동, 2005)

구분	예산천	주중천	신어천	조만강	지사천	평강천	맥도강
BOD	3.1	1.1	8.3	6.5	1.8	7.7	6.5
수질등급	III	II	V	IV	II	IV	IV

COD 농도 예측에 적용된 바 있으며(신응배 등, 1997), 잉글랜드 남서부 데번 주의 River Culm에 RMA2과 VSAS3 모형을 연결하여 사면경사 수문학을 고려한 홍수터 범람을 예측하기도 하였으며(R.A. Charlton, 1998), RMA4 모형을 이용한 동천하류부의 하도 정비 시 발생되는 현탁오염물질에 대한 조위별 흐름장 및 농도변화를 준설 전, 후에 대해 예측한 바 있으며(정용태 등, 2000), 경안천 하류구간을 대상으로 홍수시의 하천 흐름 특성분석에 RIMGIS 데이터를 이용한 RMA2와 SED-2D 모형을 적용한 바 있다(홍성민 등, 2004). 또한 최근에는 RMA2 모형을 이용해 낙동강 중류에 위치한 만섬에 강변여과 취수시설의 안전성을 검토하기 위해 흐름장을 수치모의 하고 하상전단력의 이차원 분포를 예측하고(이남주, 2004), 낙동강 상류의 반변천 합류점 부근의 탁도에 예측에 적용된 바 있다(이남주 등, 2005).

2.2.1. RMA2 모형

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. 모형의 지배방정식은 Navier-Stokes 방정식과 연속방정식을 수직적분한 2차원 천수방정식으로 다음과 같다.

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

$$b \frac{\partial u}{\partial t} + bu \frac{\partial u}{\partial x} + bu \frac{\partial u}{\partial y} \tag{3}$$

$$- \frac{b}{\rho} \left(E_{xx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + E_{yy} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + gb \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial b}{\partial x} \right) + \frac{g \omega n^2}{b^{1/3}} (u^2 + v^2)^{1/2}$$

$$- \zeta V_a^2 \cos \Psi - 2b \omega v \sin \phi = 0$$

$$b \frac{\partial v}{\partial t} + bu \frac{\partial v}{\partial x} + bv \frac{\partial v}{\partial y} \tag{4}$$

$$- \frac{b}{\rho} \left(E_{yx} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + E_{yy} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right)$$

$$+ gb \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial b}{\partial y} \right) + \frac{g \omega n^2}{b^{1/3}} (u^2 + v^2)^{1/2}$$

$$- \zeta V_a^2 \cos \Psi - 2b \omega v \sin \phi = 0$$

여기서, b 는 수심, u, v 는 직교좌표계에서의 유속, x, y, t 는 직교좌표계와 시간, ρ 는 유체의 밀도, E_{xx} 는 x 방향평면의 법선 와점성계수, E_{yy} 는 y 방향평면의 법선 와점성계수, E_{yx} 는 x 방향평면의 접선 와점성계수, E_{xy} 는 y 방향평면의 접선 와점성계수, g 는 중력가속도, a 는 하상표고, n 는 Manning의 조도계수, ζ 는 바람응력계수, V_a 는 풍속, ζ 는 풍향, ω 는 지구자전각속도, ϕ 는 위도이다.

RMA2 모형에서 사용하는 수치기법은 가중잔차 Galerkin 방법을 이용한 유한요소법으로서, 요소는 1차원 선 요소 혹은 삼각형이나 사각형 요소를 사용할 수 있으며, 포물선형 곡선이 한 변으로 사용될 수 있다. 형상함수는 유속에 대해서는 2차함수이며, 수위에 대해서는 1차함수이다. 공간적분방법으로는 Gauss 적분법이 사용되며, 시간미분항은 비선형 유한차분근사법이 사용된다. 수치기법은 완전음해법으로서, 각 시간 단계에서의 비선형 연립방정식을 Newton-Raphson 반복계산법을 사용하여 해를 구한다.

2.2.2. RMA4 모형

RMA4는 SMS의 오염물질 이송확산모형으로서 Norton 등(1973)에 의해 처음 개발되어 WES의 여러 연구자들에 의해 많은 개선이 이루어져 왔다(Thomas

와 McAnally, 1991). RMA4 모형은 주어진 격자의 속도장을 정의하기 위하여 RMA2의 수리동역학적인 해를 사용한다. 사용자가 지정한 격자점 입력이 필요한데, 이 격자점 입력은 질량 또는 농도로 정의되며 각 오염물질의 소멸율에 의해서도 정의된다. RMA4의 계산결과는 SMS의 후처리 기능을 사용하여 여러 형태의 그림으로 표시하여 검토할 수 있다(서울대학교, 2004).

RMA4 모형은 비압축성 유체에서 보존성 물질의 3차원 이송확산방정식을 수평방향에 대하여 수직적분한 2차원 이송확산방정식을 지배방정식으로 사용하여 이는 다음과 같다.

$$b \left(\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} - D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - \sigma + kC \right) = 0 \quad (5)$$

여기서, C 는 물질의 농도, D_x 와 D_y 는 각각 x 와 y 방향의 종분산계수, σ 는 물질의 질량 공급원, k 는 생·화학적 반응에 의한 물질의 소멸율을 나타낸다. RMA4는 RMA2와 마찬가지로 수치기법으로 Galerkin 방법을 사용한다.

2.3. 수치모형의 적용

2.3.1. 입력자료 및 모의조건

RMA2 모형과 RMA4 모형의 지형은 Fig. 2의 하상고 자료를 사용하였다. Fig. 3은 수치모형에서 사용한 평면 이차원 유한요소망을 도시한 것이다. 유한요소는 삼각형 요소를 사용하였으며, 가능한 정삼각형에 가깝도록 결정하였다. 사용한 삼각형 유한요소의 개수는 7,364개이며, 절점의 수는 15,870개이다.

Table 1에서 보는 바와 같이 조만강 유입유량이 서낙동강 유량의 62%를 차지하며, 지사천이 11%에 해당한다. 평강천은 약 12%를 차지하지만, 유역이 저지대로서 무강우시의 유출은 무시할 수 있을 것으로 판단하였다. 따라서 본 연구에서는 유량이 상대적으로 작은 평강천, 신어천, 예안천, 주중천의 영향은 무시하고, 조만강과 지사천 유입유량만을 고려하였다. 조만강과 지사천 평수량은 모두 조만강 하구에서 들어오는 것으로 가정하였으며, 대저수문의 유입량을

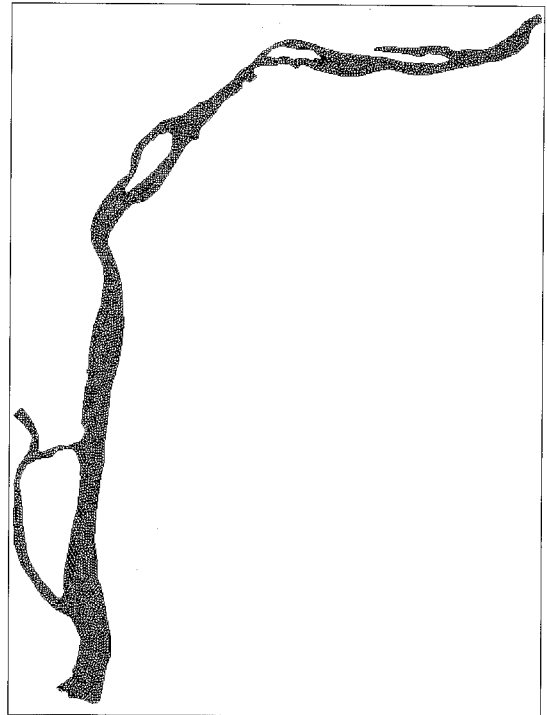


Fig. 3. 평면 이차원 모형의 유한요소망.

고려하여 결정한 수치모의조건은 Table 5와 같다. 유입수의 BOD 농도는 Table 3에 제시된 자료로부터 구한 2000~2006년까지의 평균값을 사용하였으며, 서낙동강의 초기농도는 서낙동강 1, 신어천, 서낙동강 2 지점의 자료를 평균하여 결정하였다. 하류경계에 위치한 녹산수문은 하루에 2회 개방이 가능하며, 따라서 실제로는 비정상 흐름으로 수치모의하여야 한다. 그렇지만 RMA4 모형의 모의시간은 조석주기에 비해 상당히 길기 때문에, 조석에 의한 비정상성은 무시가능하며, 따라서 흐름을 정상상태로 모의하였다.

2.3.2. 매개변수 보정

평면 이차원 흐름을 예측하는 RMA2 모형의 주요 매개변수는 Manning 계수와 와점성계수(또는 Peclet 수)이다. Manning 계수는 지형, 하상 구성물질의 종류, 식생, 흐름조건 등에 따라 상이한 값을 가지게 되는데, 본 모형에서 제안하는 전형적인 값은 Table 6과 같다.

와점성계수는 다음과 같은 Peclet 수(P)에 의해 지배된다.

Table 5. 수치모의 조건

구 분	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5	유입 BOD
대저수문 유입유량	5m ³ /s	6m ³ /s	10m ³ /s	30m ³ /s	50m ³ /s	2.8mg/L
조만강 유입유량			1.7m ³ /s			6.6mg/L
녹산 수문 유량	6.7m ³ /s	7.7m ³ /s	11.7m ³ /s	31.7m ³ /s	51.7m ³ /s	
수위			EL. -0.3m			
서낙동강 초기농도			6.7mg/L			

Table 6. 조도계수의 범위

Condition	Manning n
Shallow river without snags	0.025 ~ 0.035
Deep river	0.018 ~ 0.025
Shallow estuary without vegetation	0.020 ~ 0.030
Deep estuary	0.015 ~ 0.020
Dense vegetation in a wetland	0.05 ~ 0.100

Table 7. 와점성계수의 범위

Condition	Eddy viscosity(N · sec/m ²)
Shallow water(slow currents)	240 ~ 1,200
Shallow water(fast currents)	1,200 ~ 2,400
Deep estuary(small elements)	2,400 ~ 4,800
Deep estuary(large elements)	9,500 ~ 14,400
wetland with tidal wetting and drying	4,800 ~ 9,500
flow separation around structures	50 ~ 240

$$P = \frac{\rho U \Delta x}{E} \quad (6)$$

여기서, ρ 는 물의 밀도, U 는 요소의 평균속도, Δx 는 흐름방향으로의 요소길이, E 는 와점성계수이다. RMA2 모형은 P 가 50 이내에서 안정한 것으로 알려져 있다. 따라서 요소의 평균속도 및 격자의 크기가 커지게 되면 해의 안정성을 위하여 와점성계수의 값을 증대시켜야 하는데 와점성계수의 값이 지나치게 커지면 해의 정확성이 떨어지는 것으로 알려져 있다. RMA2 모형에서 추천하는 와점성계수의 범위는 Table 7과 같으며(EMRL, 2002), Peclet 수는 15~40의 범위에 있지만 20 이하의 값을 추천하고 있다.

RMA2 모형의 정상류에 대한 수치해를 구하는 방법은 사용자가 지정한 횟수만큼 반복계산하는 방법과 수심의 변화가 사용자가 지정한 허용범위에 들 때까지 반복계산하는 방법이 있다. 본 연구에서는 매개변수에 대한 RMA2 모형의 기본값($n = 0.025$, $E = 20 \text{ Pa} \cdot \text{s}$)를 사용하여 Table 5의 Case-5에 대하여 반복계산 횟수에 따른 수렴성을 검토하였으며, 4회 이상 반복계산하면 유속의 변화가 0.00005m/s 이하가 됨을 확인하였다. 따라서 정상류 수렴조건은 RMA2 모형의 기본 옵션을 사용한다.

신현석 등(2004)은 서낙동강, 평강천, 맥도강에 RMA2 모형을 적용하여 홍수량에 대한 흐름을 해석한 바 있으며, Manning 계수는 0.03, 와점성계수는

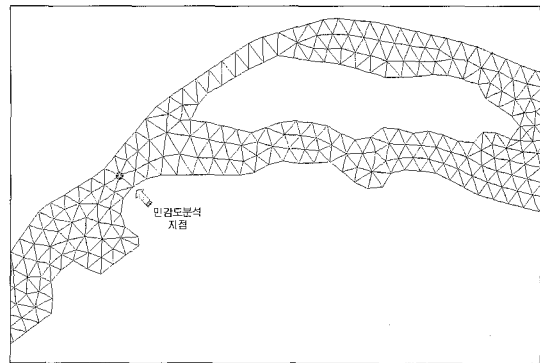


Fig. 4. 민감도분석에 사용한 격자점.

20Pa · s를 사용하였다. 본 연구에서는 유속이 가장 빠른 지점의 하나로 Fig. 4에 표시된 격자점(node ID: 12,563)을 선택하여 Manning 계수, 와점성계수, Peclet 수에 대한 민감도분석을 수행하였다. 분석대상이 아닌 매개변수는 RMA2 모형의 기본값을 사용하였다. Fig. 5와 Fig. 6은 Manning 계수에 대한 민감도분석 결과를 도시한 것이며, Fig. 7과 Fig. 8은 와점성계수에 대한 민감도분석 결과이다. Manning 계수와 와점성계수는 모두 흐름 저항을 표현하는 물리량이기 때문에 값이 클수록 수심이 증가하고 유속은 작아진다. 서낙동강에는 흐름모형의 매개변수를 보정할 자료가 없는 상태이므로, 신현석 등(2004)의 연구결과를 참조하여, Manning 계수는 0.03, 와점성계수는

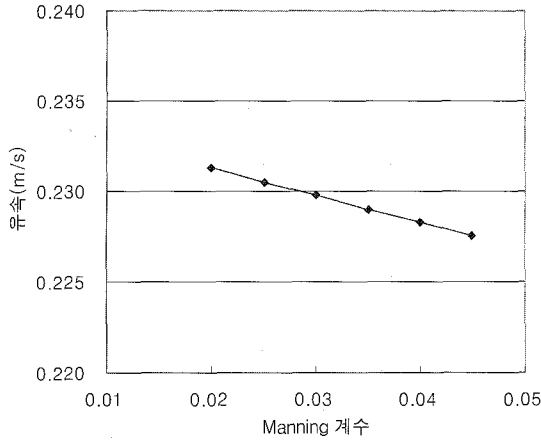


Fig. 5. Manning 계수에 따른 유속 변화.

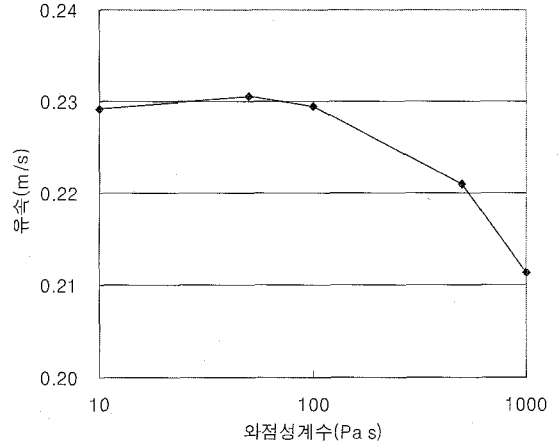


Fig. 7. 와점성계수에 따른 유속 변화.

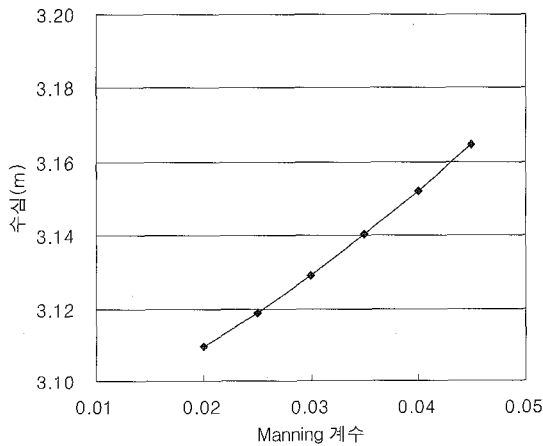


Fig. 6. Manning 계수에 따른 수심 변화.

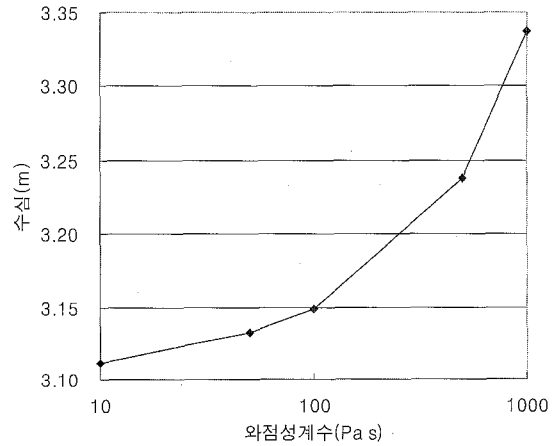


Fig. 8. 와점성계수에 따른 수심 변화.

20Pa·s로 결정하였으며, 수온은 15°C를 사용하였다.

Case-5의 흐름계산결과를 사용하고, 이송확산모형의 확산계수를 변화시켜 가면서 확산계수에 대한 민감도분석을 수행하였다. 확산계수는 0.01, 0.05, 0.1, 0.5m²/s에 대하여 정상상태의 BOD를 예측하였으며, RMA4 모형의 적용결과는 Fig. 9와 같다. 그림에서 확산계수는 완전히 혼합되는 거리에 큰 영향을 주고 있음을 확인할 수 있다. 민감도분석 결과 확산계수로 0.5m²/s 이상의 값을 사용할 경우 과도한 확산이 발생할 것으로 판단된다. 확산계수는 대략 0.01~0.1m²/s의 범위에 있다고 판단되며, 본 연구에서 확산계수는 0.05m²/s로 결정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 평면 이차원 흐름예측

Table 5의 각 모의조건에 대하여 정상류 흐름을 모의하였으며, Fig. 10~13은 각각 Case-1, 3, 4, 5에 대한 등유속선을 도시한 것이다. 모의조건 Case 1~5에 대하여 격자점의 갯수로 평균한 유속은 각각 0.009, 0.010, 0.015, 0.040, 0.064m/s이다. 수위는 Case 1~5에 대하여 각각 EL. -0.307~-0.026m, EL. -0.308~-0.026m, EL. -0.309~-0.026m, EL. -0.304~-0.0215m, EL. -0.418~-0.096m의 범위에 있다.

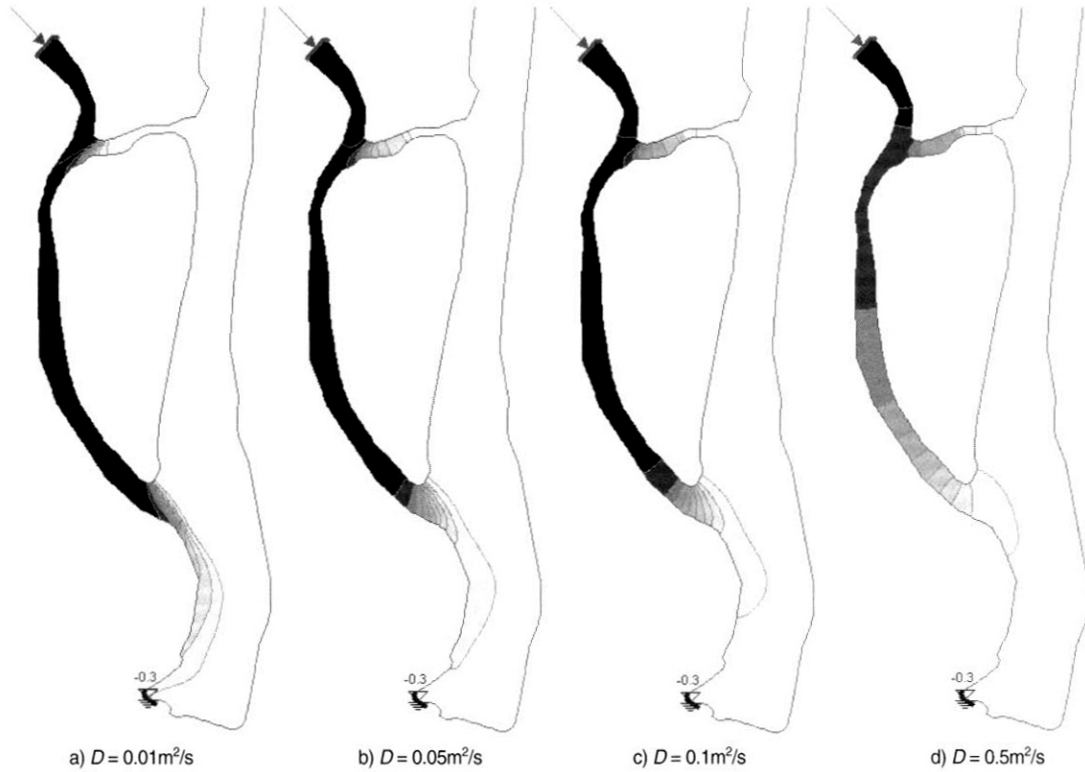


Fig. 9. 확산계수에 따른 BOD 농도 분포.

3.2. 평면 이차원 BOD 농도 예측

Table 8은 모의조건별로 평면 이차원 BOD 농도를 수치모의할 때 사용한 계산시간 간격과 수치모의시간을 정리한 것이다. Fig. 11a는 Case-1에 대한 BOD 농도 예측결과를 도시한 것으로 이 경우 녹산수문 지점에서 목표수질(BOD 4.3mg/L 이하)을 달성하려면 약 40일 정도의 시간이 필요함을 알 수 있다. 또한 대저수문을 통한 유입유량이 작기 때문에 조만강에서 유입되는 BOD의 영향이 서낙동강교 하류부에 전체적으로 영향을 미치며, 녹산수문에서 서낙동교까지 넓은 혼합영역을 형성한다. Fig. 11b는 Case-2에 대한 BOD 농도 예측결과를 도시한 것으로, Case-1과의 유량 차이가 1m³/s 정도에 불과하기 때문에 거의 같은 결과를 보여 주고 있다. Fig. 11c~e는 Case-3~

Case5의 BOD 농도 예측결과를 도시한 것이다. Case-3의 경우 녹산수문 지점에서 목표수질을 달성 하려면 20일 정도의 시간이 필요하며, Case-4는 약 10일, Case-5는 약 5일 정도의 시간이 소요될 것으로 예측되었다.

Fig. 11-15의 BOD 농도 예측결과는 조만강 이외의 지천의 유입 유량 및 오염부하량을 무시하고, 저질로부터의 용출을 무시하고, BOD를 보존성 물질로 가정한 조건 하에서 계산한 결과이다. 따라서 실제현상과는 다소 차이가 있을 수는 있지만, 대저수문에서 30m³/s 정도의 유량을 지속적으로 유입시켜서 대저수문과 녹산수문을 연계운영하면 녹산수문 지점에서 목표수질 달성이 가능할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 서낙동강의 수리·수문 및 수질현황을 조사분석하였고, 평면 이차원 수질모형의 민감도분석을 통해 수치모형의 매개변수를 결정하였다.

Table 8. 수치모의시간 및 시간간격

구분	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5
시간간격(hr)	6	6	4	2.0	1.0
모의시간(hr)	1500	1500	800	300	150

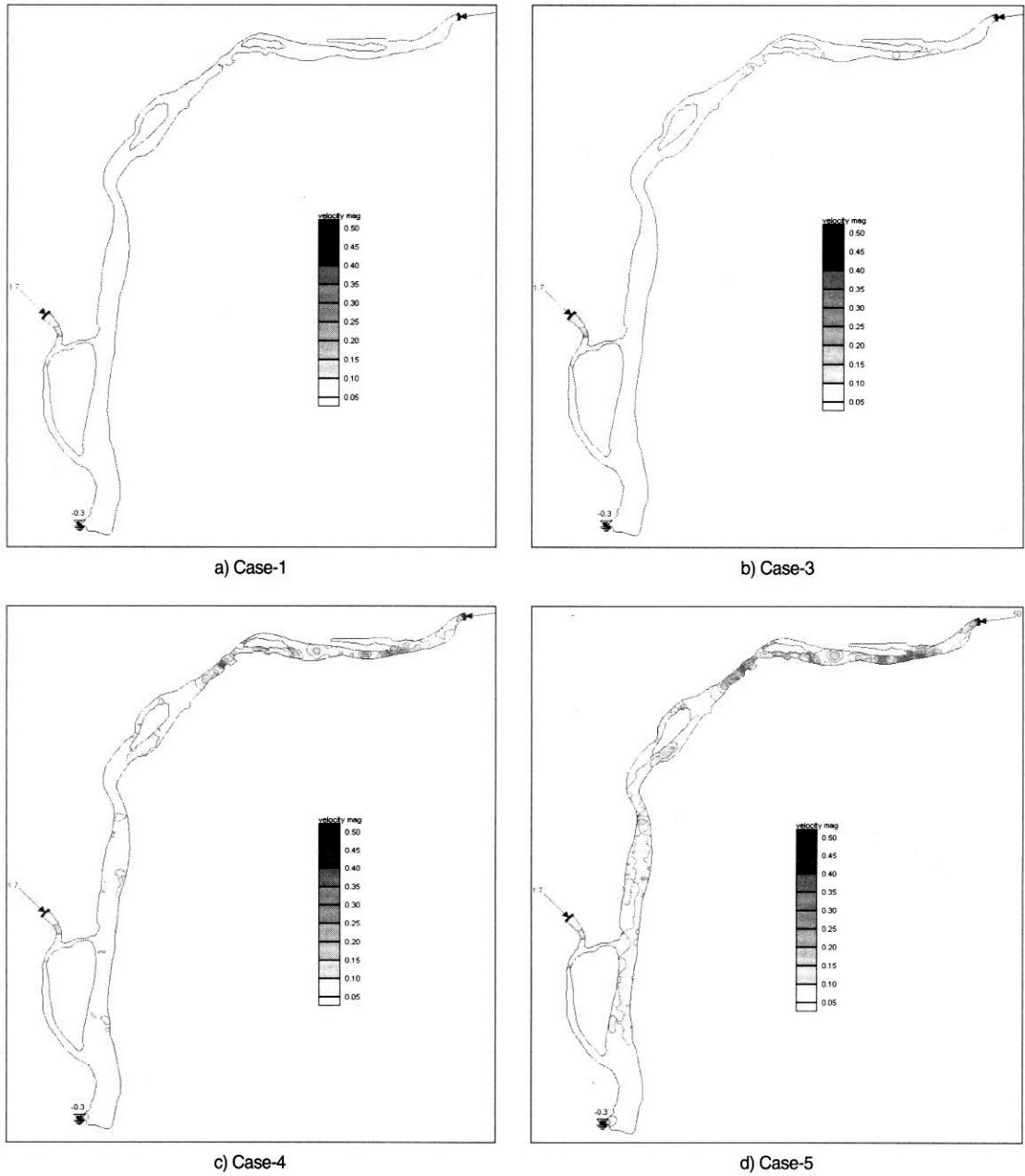


Fig. 10. 등유속선도.

대저수문과 녹산수문을 연계운영할 경우에 대한 모의 조건을 설정하고, 이차원 수치모형을 사용하여 서낙동강 본류의 흐름장 및 BOD 농도 분포를 예측하였다.

1) 수문 연계운영을 통한 목표수질(BOD 4.3mg/L

이하) 달성 소요시간을 예측하였다.

- 5~6m³/s 유입: 약 40일
- 10m³/s 유입: 약 20일
- 30m³/s 유입: 약 10일
- 50m³/s 유입: 약 5일

2) 본 연구의 결과는 조만강 이외의 지천의 영향,

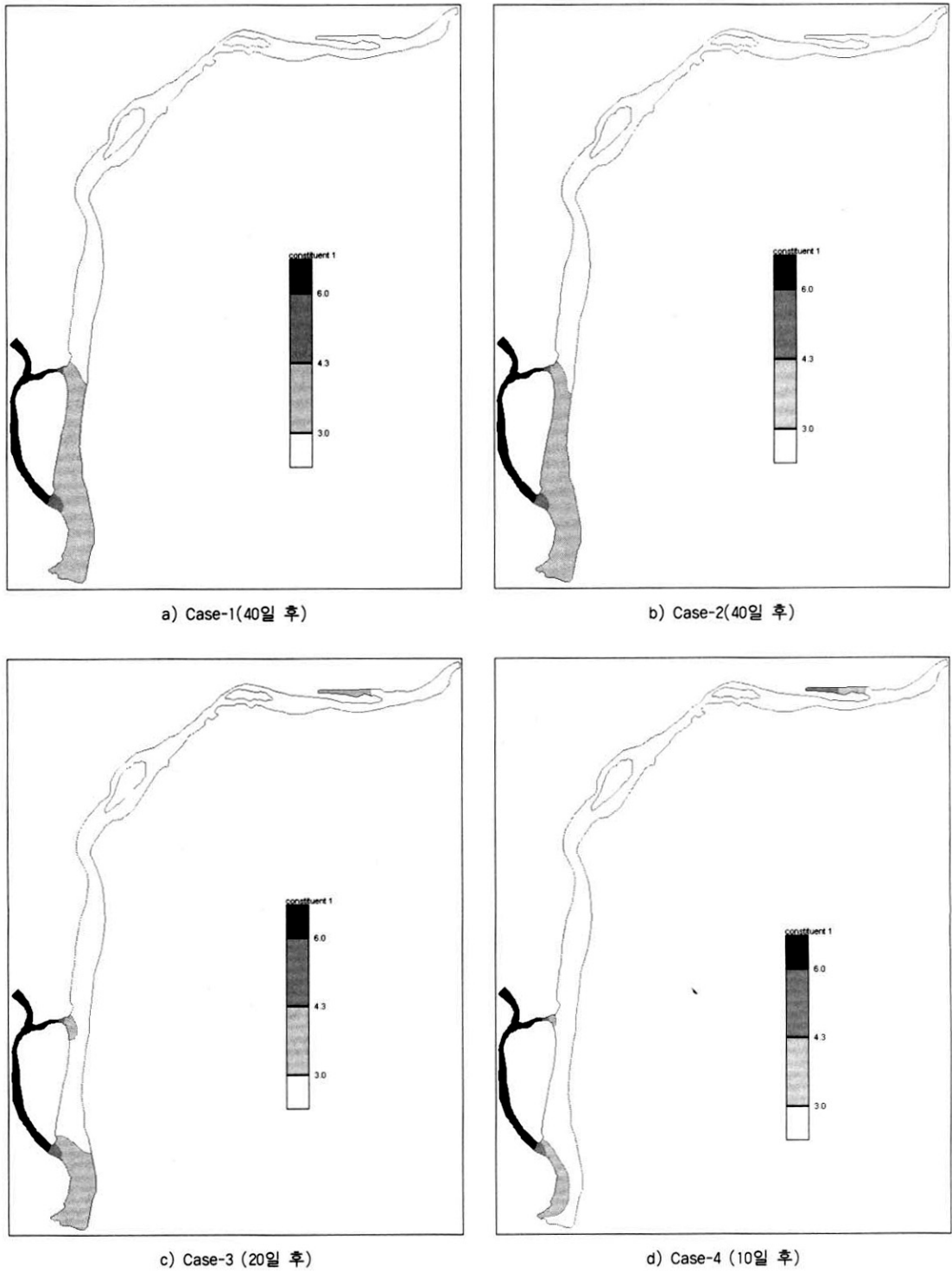
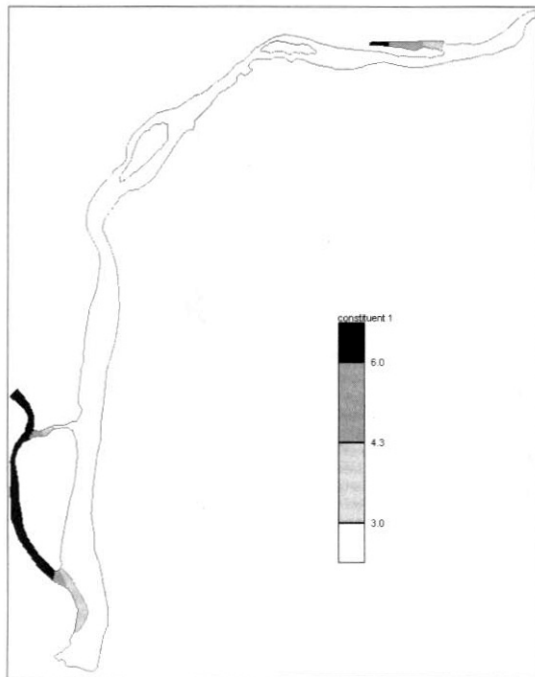


Fig. 11. 모의조건에 의한 BOD 농도분포.



e) Case-5 (5일 후)

Fig. 11. 계속

저질 용출, 오염물 분해 등을 고려하지 않은 결과로서 실제현상과는 다소 차이가 있을 수는 있지만, 대저수문에서 30m³/s 정도의 유량을 지속적으로 유입시켜서 대저수문과 녹산수문을 연계운영하면 녹산수문 지점에서 목표수질 달성이 가능할 것으로 판단된다.

3) 서낙동강에서 수치모형의 매개변수를 추정 및 검증에 위한 실측자료 등이 체계적으로 축적된다면, 보다 정확한 수치모의가 가능할 수 있을 것으로 판단하며, 향후 수문을 연계운영할 경우에는 녹산수문 하류 해역에 미치는 수질영향에 대한 구체적인 연구도 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 현대엔지니어링(주)의 지원 및 경남지

역환경기술개발센터 연구개발사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 부산지방국토관리청 (2001) 서낙동강하천정비기본계획 - 서낙동강(보완), 평강천, 맥도강, 건설교통부, pp. 부도1~부도10.
2. 서낙동강유역관계기관합동 (2005) 철새들의 낙원 서낙동강 수질개선 종합대책, pp. 17~23.
3. 서울대학교 (2004) 하천흐름 및 하상변동 해석기술 개발. 21세기 프론티어연구개발사업 - 수자원의 지속적인 확보기술개발사업, 과학기술부, pp. 266~281.
4. 신용배, 이길성, 서동일, 최홍식, 이남주 (1997) 시화방조제 배수갑문 조작 관리 규정(수정안), 한국물학술단체연합회, pp. 15~35.
5. 신현석, 서규우, 신사철, 박무중 (2004) 낙동강 하천 수리특성 분석 및 수리모의 예측기법 개발(1차년도), 부산대학교 생생산기술연구소, pp. 168~174.
6. 이남주 (2004) RMA2 모형을 이용한 낙동강 탄성 주변 흐름장 예측, *경성대학교 공학기술연구지*, 11, pp. 63~70.
7. 이남주, 김영도, 류시완 (2005) 임하호 및 낙동강의 탁도 예측모형 개발, *경성대학교 산학협력단*, pp. 126~149.
8. 정용태, 박원길 (2000) RMA4 모형에 의한 동천하류부에서의 현탁물질확산 특성 연구, *환경관리학회지*, 6(3), pp. 315~322.
9. 홍성민, 정인균, 이준우, 김성준 (2004) SMS를 이용한 경안천 하류구간의 하천흐름 분석, *한국지리정보학회지*, 7(1), pp. 94~104.
10. EMRL (2002) SMS Surface Water Modeling System Tutorial, Version 8.0. Brigham Young University, pp. 2-1~2-20.
11. R. A. Charlton (1999) Initial Stages in the Development of Coupled Hillslope Hydrology Floodplain Inundation Model, *Phys. Chem. Earth(B)*, 24(1-2), pp. 37~41.