



하상오염물 제거에 의한 수질개선효과 수치모델링

Numerical Simulation of Water Quality Enhancement by Removal of Contaminated Bed Material

이남주

Lee, Namjoo

경성대학교 토목공학과

2011년 5월 6일 접수 ; 2011년 6월 9일 수정 ; 2011년 6월 13일 채택)

Abstract

This study has an objective to estimate effect on water-quality enhancement by removal of contaminated river-bed material using a two-dimensional numerical modeling in the Seonakdong River, the Pyunggang River and the Maekdo River. RMA2 and RMA4 models were used for flow and contaminant transport simulation, respectively. After the analysis of the effects of flow restoration plan for the Seonakdong River system made by Lee et al (2008), simulation have been performed about scenarios which contains operations of the Daejeo Gate, the Noksan Gate, the Makdo Gate (on planning), and the Noksan Pumping Station. Because there is no option for elution from bed sediment in the RMA4 model, a simple technique has been used for initial condition modification for elution. The analyses revealed that the effect on water quality improvement due to dredging of bed sediment seemed to be less than 10 % of the total effect. The most efficient measure for the water quality improvement of the river system was the linked operation of water-gates and pumping station.

Key words : water-quality, elution, the Seonakdong River, RMA2, RMA4

주제어 : 수질, 용출, 서낙동강, RMA2, RMA4

1. 서론

서낙동강은 상류에 위치한 대저수문과 하구에 위치한 녹산수문으로 인해 정체수역이 형성되는 전형적인 호소형 하천이다. 대동수문과 대저수문은 1934년에 농업용수 확보를 목적으로 건설되었으며, 1992년에 녹산2수문이 건설되었고, 1997년에는 대동수문의 규모를 확대하였다(낙동강 공동체, 2004). 정체수역인 호소형 하천의 수질이 저하되는 원인은 상류에 위치한 점오염원과 비점오염원의 오염물

질 유입과 하류에 위치한 수문 등에 의하여 수체가 장기간 정체되기 때문이다. 현재 서낙동강의 상황은 다음과 같이 정리할 수 있다: i) 대저수문과 녹산수문에 의해 수체가 정체되어 자정능력이 저하된 상태에서, ii) 부산 강서구 지역의 개발과 김해시 지역의 도시화로 인해 유입되는 오염물질이 크게 증가하였고, iii) 오염물이 하천의 자정능력을 초과하였고, iv) 유입된 오염물질이 하천의 바닥에 쌓이게 되어 수체와 하상도가 심하게 오염된 상황이다.

정체수역의 흐름복원을 통한 수질개선에 대한 연구로써

이남주 등(2006)은 시화호와 서낙동강에 대한 수질복원방안을 제시한 바 있으며, 이남주 등(2007)과 이금찬 등(2009)은 서낙동강에 대한 흐름 및 수질 모델링을 통해 수질개선방안을 제시한 바 있다. 황경엽 등(2007)은 낙동강 및 서낙동강 퇴적물의 특성에 대한 연구를 수행하였다. 그렇지만, 퇴적물로부터의 용출현상을 고려한 이차원 모델링에 대한 연구와 이런 결과를 사용한 수질개선방안 평가에 대한 연구는 찾아보기 어려운 상황이다. 이 연구는 대저수문, 맥도수문, 녹산배수펌프장을 연계하여 운영하는 서낙동강 흐름복원대책(이남주 등, 2009)을 적용할 경우에 대하여 평면 이차원 수치모형을 사용하여 오염된 하상도 제거 후의 수질개선효과를 평가할 목적으로 수행하였다.

2. 연구내용 및 방법

2.1 현황 조사 및 분석

서낙동강 유역도에 주요 배수펌프장을 추가하여 **그림 1**에 도시하였다. 서낙동강으로 유입하는 지천은 조만강을 포함하여 8개가 있으며, 서낙동강에는 강체배수로써 수위조절이 가능하도록 녹산배수펌프장, 맥도배수펌프장, 신포배수펌프장이 설치되어 있다. 서낙동강유역관계기관합동(2005)은 낙동강수계 오염총량관리 대상오염물질인 BOD를 기준으로 서낙동강 유역의 수질변화를 검토하였으며, 2004년도의 서낙동강의 연평균 BOD는 농업용수기준(BOD 8 mg/L 이하)을 만족하는 수준이었다. 2000년 김해시 화목하수처리장이 건설되었고, 이후 장유하수처리장과 부산시의 강동하수처리장이 추가로 건설되었으며, 2000년대 후반부터 대저수문을 통한 수체교환이 지속적으로 수행

되고 있다. 이런 수질개선 노력에 의해 서낙동강의 연평균 BOD는 지속적으로 개선되고 있으나, 서낙동강 유역 기준 지점(낙본N, 녹산수문)의 목표수질인 BOD 4.3 mg/L에 근접하거나 초과하는 일수가 가끔 측정되고 있다.

이남주 등(2008)은 서낙동강과 지천의 17개 지점 중 8지점(둔치도 입구, 둔치도 출구, 조만강, 조만강 합류점, 대저수문, 주중천 합류점, 강동교, 녹산수문)을 선정하여 호기성 및 혐기성 상태에서 용출량 평가를 수행하였다. **표 1**은 이남주 등(2008)이 제시한 각 지점별 암모니아성 질소, 질산성 질소, 인산염인의 단위면적당 용출율의 계산결과를 정리한 것이다. 영양염류는 물리적 용출이 일어남과 동시에 생분해 및 재흡착 등에 의해 수중농도의 감소가 일어난다. 이 연구에서는 용출속도를 계산하기 위해 30일 동안 용출된 영양염 용출 결과를 평균하여 사용하였다.

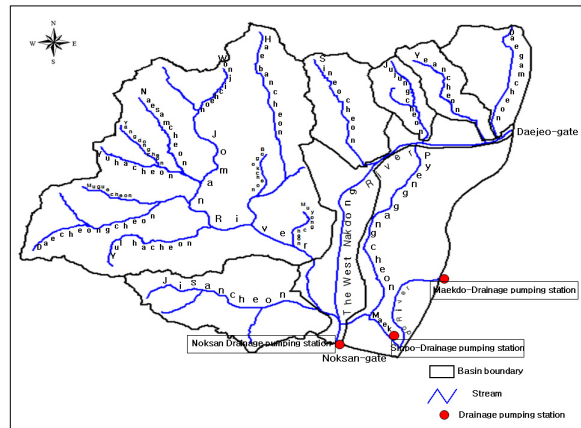


그림 1. 서낙동강 유역 하천 및 주요 수리구조물(이금찬 등, 2009)

표 1. 지점별 영양염 용출 속도(이남주 등, 2008)

지점번호	지점 설명 및 구분		암모니아성 질소	질산성 질소	인산염 인
			(mg/m ² /d)	(mg/m ² /d)	(mg/m ² /d)
7	둔치도 입구	호기성	0.14	0.080	0.070
		혐기성	0.221	0.047	0.041
10	둔치도 출구	호기성	0.014	0.064	0.058
		혐기성	0.084	0.022	0.054
8	조만강	호기성	0.104	0.078	0.058
		혐기성	0.248	0.030	0.069
9	조만강 합류	호기성	0.039	0.038	0.038
		혐기성	0.254	0.115	0.087
1	대저수문	호기성	0.031	0.003	0.007
		혐기성	0.009	0.001	0.011
3	주중천 합류	호기성	0.064	0.003	0
		혐기성	0.020	0.008	0.031
6	강동교	호기성	0.085	0	0.003
		혐기성	0.102	0.003	0.008
11	녹산수문	호기성	0.063	0.007	0.097
		혐기성	0.084	0.134	0.039

2.2 서낙동강 흐름복원방안

서낙동강 유역에 대한 오염부하량을 저감하려는 노력을 하고 있음에도 불구하고, 낙동강이나 다른 하천에 비해 수질개선 효과가 크지 않은 이유는 흐름이 거의 없기 때문이다. 이 문제를 해결할 수 있는 유일하고 지속 가능한 대책은 대저수문, 녹산수문, 낙동강 우안의 제방 설치(그림 2 참조)로 인한 흐름 단절 이전의 상태로 흐름을 복원하는 방법이다. 서낙동강의 흐름이 복원되면, 가장 큰 효과는 수체의 수질개선이겠지만, 하상토의 오염 역시 저감 또는 개선될 수 있다. 현재와 같이 흐름이 단절된 상황에서는 유역에서 유입된 오염물이 지속적으로 하상에 퇴적되지만, 서낙동강에 지속적으로 물이 흐를 경우는 오염물질의 퇴적 현상이 현저히 줄어들며, 또한 현재 퇴적된 오염물이 수체로 용출됨에 따라 장기적으로는 퇴적토의 질 역시 충분히 개선될 것으로 기대된다.

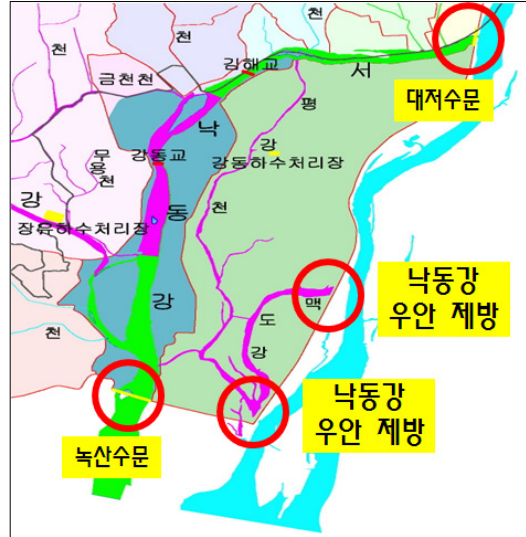


그림 2. 서낙동강의 흐름 차단 지점

낙동강의 물을 이용한 서낙동강, 평강천, 맥도강의 흐름 복원 대책의 각 방법별 수질 개선 효과를 개선 대상 수체별로 평가하면 표 2와 같다. 방류수역에 미치는 영향과 상시 운영 가능성을 고려할 때 가장 효과적인 대책은 맥도수문을 신설하고, 대저수문, 맥도수문, 녹산배수펌프장을 연계운영하는 방법으로 판단된다. 현재의 상황에서는 녹산수문에서 상시 방류는 불가능하기 때문에 대저수문, 녹산배수펌프장, 신포배수펌프장을 연계운영하는 방법이 서낙동강 수질개선 영역이 가장 클 것으로 판단된다.

2.3 RMA2 모형의 기본이론

RMA2 모형은 미공병단에서 1973년에 처음 개발(US Army Corps of Engineers, 1996)된 이래, 하중도를 포함한 하천 수로구간의 흐름, 교각 부근의 흐름, 유수단면 확대 및 축소부를 포함한 하천구간의 흐름 예측 등을 포함하여, 하천, 저수지, 하구의 수리동역학적 해석에 널리 사용되어 왔다. RMA2 모형은 천수가정을 사용하여 수심적분한 천수 방정식을 지배방정식으로 사용한다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} + h \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) = 0 \quad (1)$$

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

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

여기서, x, y 는 평면직교좌표계, h 는 수심, u, v 는 x, y 방향의 수심적분된 유속, ϵ_{xx} 는 x 방향 평면의 법선 외점성계수, ϵ_{yy} 는 y 방향 평면의 법선 외점성계수, ϵ_{xy} 는 x 방향평면의 접선 외점성계수, ϵ_{yx} 는 y 방향평면의 접선 외점성계수, g 는 중력가속도, a 는 하상표고, n 는 Manning 계수, V_a 는 풍속, ζ 는 바람응력계수, ψ 는 풍향, ω 는 지구자전각속도, ϕ 는 위도이다.

2.4 RMA4 모형의 기본이론

RMA4 모형은 2차원 수심 평균된 수질예측 유한요소 모형이다. 이 모형은 1973년 WWDCE(Walla Walla District Corps of Engineers) 수자원 엔지니어인 Orlob, King, Norton(Norton 등, 1973)에 의하여 개발된 이후 수체에서의 오염물질 거동 해석에 적용되어 왔다. RMA4 모형은 농도가 연직방향으로 완전히 혼합된 비압축성 유체에서 보존성 물질의 3차원 이송확산방정식을 수평방향에 대하여 수심적분한 2차원 이송확산방정식을 지배방정식으로 사용한다.

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

여기서, C 는 오염물질의 농도, D_x 와 D_y 는 각각 x, y 방향의 난류확산계수, σ 는 오염물질의 국부적 생성·소멸항, k 는 생·화학적 반응에 의한 오염물질의 소멸 계수이다.

표 2. 서낙동강 흐름 복원 대책의 효과 분석(이남주 등, 2008)

시설물		수질개선효과					방류 수역	상시 운영
유입	방류	서낙동강 상류	서낙동강 중류	서낙동강 하류	평강천	맥도강		
대저 수문	녹산수문	○	○	○	△	×	해역	×
	녹산 펌프장	○	○	○	△	×	해역	○
	신포 펌프장	○	△	×	○	×	해역	△
	녹산&신포 펌프장	○	○	○	○	×	해역	△
	맥도 펌프장	○	△	×	○	○	낙동강	△
	녹산&맥도 펌프장	○	○	○	○	○	낙동강	△
맥도 수문	녹산수문	×	△	○	△	○	해역	×
	녹산 펌프장	×	△	○	△	○	해역	○
	신포 펌프장	×	×	×	×	○	해역	△
대저&맥도	녹산수문	○	○	○	△	○	해역	×
	녹산 펌프장	○	○	○	△	○	해역	○
	신포 펌프장	○	○	○	△	○	해역	△

표 3. 지천의 유입 BOD 농도 입력값

지천	주중천	예안천	조만강	대감천	신어천	지사천	평강천	맥도강	낙동강
BOD (mg/L)	7.96	7.96	7.96	7.96	7.96	7.96	7.96	7.96	2.94

3. 결과 및 고찰

3.1 입력자료 및 시나리오

서낙동강의 하상은 완만하여 경사는 1/24,000~1/30,000 정도이며, 수치모형의 지형은 서낙동강 하천정비기본계획(부산지방국토관리청, 2001)의 하천측량자료를 이용하여 구축하였다. 하상이 가장 깊은 곳의 표고는 EL. -12.0 m이며, 수치모형 적용을 위한 수치안정성과 하류경계조건을 고려하여 가장 높은 표고를 EL. -0.5 m로 조정하였다. 수치모형에 사용한 평면 이차원 유한요소망은 삼각형 요소를 사용하였으며, 유한요소의 개수는 5,351개이며, 격자점의 수는 12,070개이다. 표 3은 지천과 낙동강 본류에서 유입되는 BOD 농도 경계조건을 정리한 것이다. 이금찬 등(2009)은 동일한 영역에서 RMA2와 RMA4 모형에서 사용하는 매개변수들에 대한 민감도 분석을 수행한 바 있으며, 이 결과를 사용하여 모형의 매개변수를 보정한 바 있다. 이 연구에서는 이금찬 등(2009)이 결정한 RMA2와 RMA4 모형의 매개변수 값(Manning 계수 0.025, 난류교환계수 1,000 Pas, Peclet 수 20, RMA4 모형의 확산계수 1.0 m²/s)을 사용하여 수치모델링을 수행하였다.

녹산배수펌프장은 홍수배제용도의 펌프 이외에 5 m³/s 용량을 가진 수질개선용도의 펌프가 2대 설치되어 있다(부산광역시 건설본부, 2004). 표 2의 내용과 녹산배수펌프장

의 상황을 고려하여 설정한 수치모의조건을 정리하면 표 4와 같다. 대저수문(DJ-G)과 맥도수문(MD-G)에서 유입시키고, 녹산펌프장(NS-P)과 녹산수문(NS-G)에서 유출하는 조합으로 모의조건을 선정하였으며, RMA2와 RMA4 모형은 10가지 조건에 대하여 수치모의하였다. 국부적인 흐름모델링 관점에서는 녹산배수펌프장 방류량과 녹산수문 방류량은 별도로 지정하여 계산해야 정확한 수치해를 얻을 수 있다. 그렇지만, 대상영역 전체적인 관점에서 볼 때, 수문과 펌프장은 상당히 인접해 있기 때문에 수문과 펌프장을 같은 지점에서 방류하는 조건을 사용하더라도 국부적인 유속장의 차이가 전체적인 흐름장에 미치는 영향은 무시할 수 있는 정도라고 판단하였다. 따라서 이 연구에서는 녹산배수펌프장의 방류량을 녹산수문에서 배수하는 것으로 수치모의하였다.

표 4에서 MD는 맥도수문으로만 낙동강 본류수를 유입시키는 경우로 맥도강의 경우 수질개선효과를 기대할 수 있지만, 서낙동강과 평강천 대부분의 영역은 수질개선효과를 기대할 수 없고 단지 하류의 일부 지역만 수질개선효과가 나타날 것으로 기대되는 모의조건에 해당한다. 따라서, 서낙동강과 평강천의 수질을 개선하기 위해서는 대저수문 운영이 필수적이며, 이런 상황이 고려된 경우가 모의조건 MDDJ에 해당한다.

표 4. 수문-펌프장 연계운영 모의조건

- 지천 유입유량 합계 = 1.0 m³/s (갈수기 유량)
- 하류의 수위 경계조건: EL. 0.0 m

모의조건	유입		유출		경계처리	비고
	맥도수문 (MD-G)	대저수문 (DJ-G)	녹산펌프장 (NS-P)	녹산수문 (NS-G)		
MD-1	4.0	-	5.0	-	MD-G: 유량 NS-G: 수위 NS-P: 수위	맥도수문만의 수질개선효과
MD-2	9.0	-	10.0	-		
MD-3	14.0	-	10.0	5.0		
MD-4	19.0	-	10.0	10.0		
MDDJ-1	1.0	3.0	5.0	-	MD-G: 유량 DJ-G: 유량 NS-G: 수위 NS-P: 수위	맥도수문과 녹산수문 연계운영 효과
MDDJ-2	2.0	2.0	5.0	-		
MDDJ-3	3.0	6.0	10.0	-		
MDDJ-4	4.5	4.5	10.0	-		
MDDJ-5	6.0	13.0	10.0	10.0		
MDDJ-6	9.0	10.0	10.0	10.0		

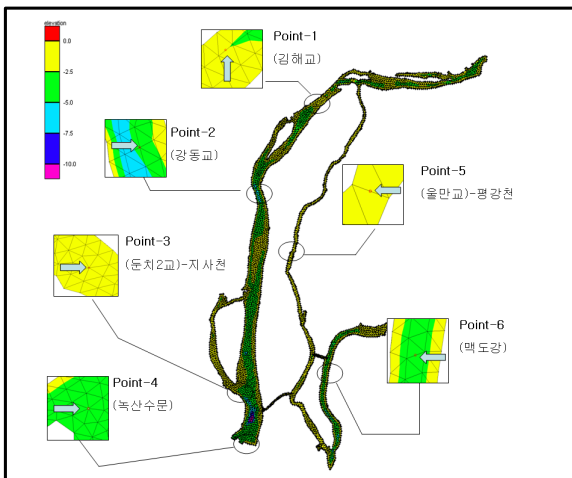


그림 3. 분석에 사용한 격자점 위치

3.2 수리모델링 결과 분석

표 4에 설정한 각각의 모의조건으로 수치모델링한 경우에 대하여 서낙동강의 수질변화경향을 분석하기 위하여 본류에 3지점, 지천에 3지점을 선정하여 100일 동안의 농도변화를 분석하였다. 그림 3은 분석에 사용한 격자점의 위치도이다. 본류의 김해교, 강동교, 녹산수문과 지사천의 둔치2교는 수질측정망이 있는 곳이며, 평강천과 맥도강은 수질측정망이 없어 수질의 변화를 쉽게 볼 수 있는 중간 지점을 선정하였다. 서낙동강의 초기 BOD 농도와 지천 유입수의 BOD는 10년간(1997년~2006년) 서낙동강 본류 수질측정망들의 평균치인 7.96 mg/L를 사용하였다. BOD 농도분포 예측결과는 하상퇴적물로부터의 용출을 고려하지 않고,

오염물질인 BOD를 보존성 물질로 가정하고 정상상태로 계산하였다.

3.3 흐름 예측 결과 분석

서낙동강, 평강천, 맥도강으로 유입하는 지천을 고려할 경우 RMA4 모형에 의해 예측되는 농도장이 비현실적인 결과를 보이는 것으로 나타났기 때문에, 그리고 각 지천의 유량은 방류량과 비교할 때 상당히 작기 때문에 가장 큰 지류인 조만강만을 고려하여 흐름과 농도를 예측하였다. 표 4에 설정한 모의조건에 대한 흐름 경향은 유속의 차이가 있기는 하지만 대부분 유사한 특징을 보였다. 따라서 유속이 가장 큰 경우에 대한 흐름장을 도시하였다. 서낙동강의 경우는 통수능에 비해 유량이 상당히 작기 때문에 서낙동강 전체 영역에 대해서 수위의 변화가 거의 없는 것으로 나타났다. 그렇지만, 맥도수문으로 물을 유입시키면 수로의 폭과 수심이 얇은 평강천을 지나야 하기 때문에 맥도강의 수위가 가장 높으며, 수면경사 역시 서낙동강 보다는 상당히 큰 것을 알 수 있다. 따라서 맥도수문을 통해 유입된 물은 평강천의 하류 방향으로 흘러 서낙동강으로 유입되기도 하지만 상당한 유량이 상류쪽으로 복류하여 서낙동강의 상류로 유입되는 현상이 나타난다.

그림 4와 5는 각각 MD-4와 MDDJ-6에 대한 유속 백터를 도시한 것이다. MD-4의 경우는 대저수문에서 물을 유입시키지 않기 때문에 대저수문 인근 지역의 흐름이 정체되는 것을 확인할 수 있다. 평강천의 중상류는 흐름이 북쪽으로 진행되는 현상이 나타나고 있다. MDDJ-6의 경우는 대저수문에서 물을 유입시키기 때문에 서낙동강, 평강천, 맥

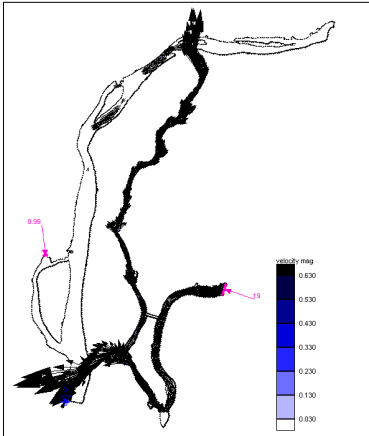


그림 4. MD-4에 대한 유속 예측결과

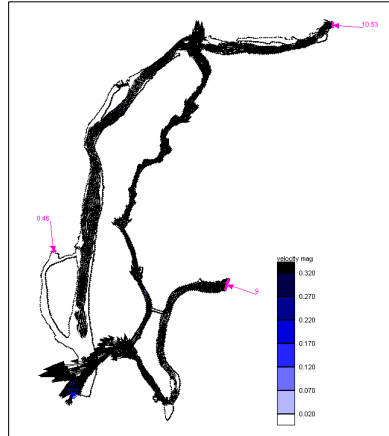


그림 5. MDDJ-6에 대한 유속 예측결과

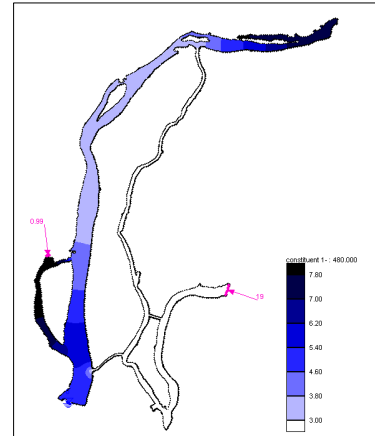


그림 6. MD-4에 대한 BOD 농도 예측결과 (20일 후)

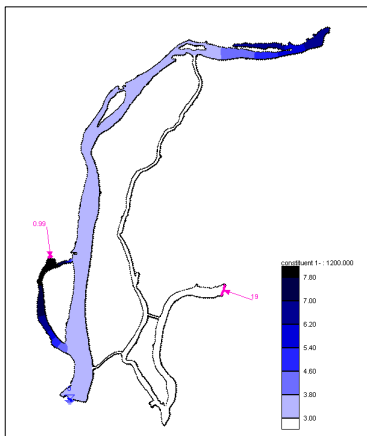


그림 7. MD-4에 대한 수위 예측결과 (50일 후)

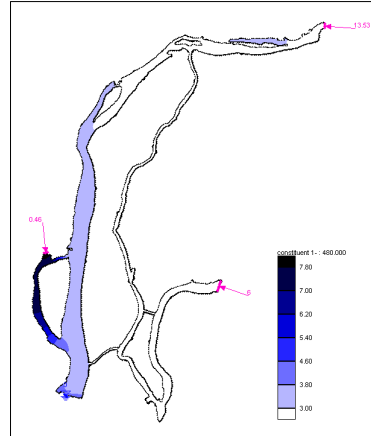


그림 8. MDDJ-5에 대한 BOD 농도 예측결과 (20일 후)

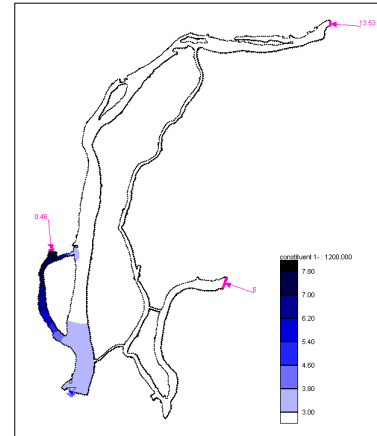


그림 9. MDDJ-5에 대한 BOD 농도 예측결과 (50일 후)

도강 모두에서 흐름이 정체되는 영역이 거의 없는 것을 확인할 수 있다.

3.4 이차원 농도 예측 결과 분석

유속이 가장 큰 경우에 해당하는 MD-4, MDDJ-5, MDDJ-6의 경우에 대해서만 농도예측결과를 그림에 수록하였다. 그림 6과 그림 7은 MD-4에 대한 BOD 예측 결과로 각각 20일 후와 50일 후의 농도장을 도시한 것이다. 이 경우 수체교환에 의한 수질개선효과가 나타나는 영역은 맥도강과 평강천, 그리고 서낙동강 하류의 녹산수문 인근 지역인 것으로 나타났다. MD-4의 경우는 대저수문에서 물을 유입시키지 않기 때문에 대저수문 인근 지역의 흐름이 정체되어, 서낙동강 상류는 수질개선효과가 전혀 나타나지 않는다.

그림 8과 그림 9는 MDDJ-5에 대한 BOD 예측 결과로 각각 20일 후와 50일 후의 농도장을 도시한 것이다. 이 경

우 수체교환에 의한 수질개선효과가 나타나지 않는 영역은 거의 없는 것으로 나타났다. 그림 10과 그림 11은 MDDJ-6에 대한 BOD 예측 결과로 각각 20일 후와 50일 후의 농도장을 도시한 것이다. 이 경우 역시 MDDJ-5와 마찬가지로 수체교환에 의한 수질개선효과가 나타나지 않는 영역은 거의 없는 것으로 나타났다. 그렇지만, 서낙동강 본류의 수질개선은 대저수문이 지배하고 맥도강과 평강천의 경우는 맥도수문이 지배한다는 관점에서 볼 때, 그리고 수질개선 대상수체의 규모를 고려하면, 대저수문의 유입유량이 맥도수문에 비해 상대적으로 작다고 볼 수 있기 때문에 서낙동강의 수질개선효과가 맥도강에 비해 느리게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 따라서 수체 규모의 균형을 고려하면 MDDJ-5의 경우가 서낙동강, 평강천, 맥도강의 균형적 수체교환 목적에서 MDDJ-6보다 바람직한 조건이라고 판단할 수 있다.

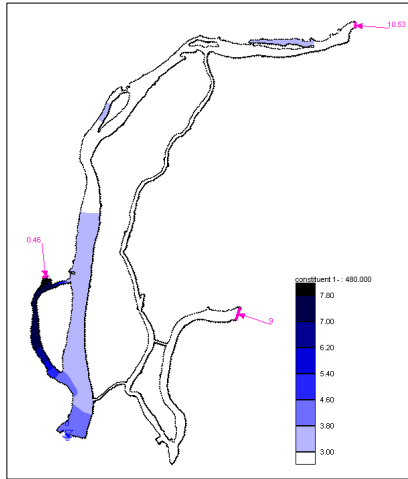


그림 10. MDDJ-6에 대한 BOD 농도 예측결과 (20일 후)

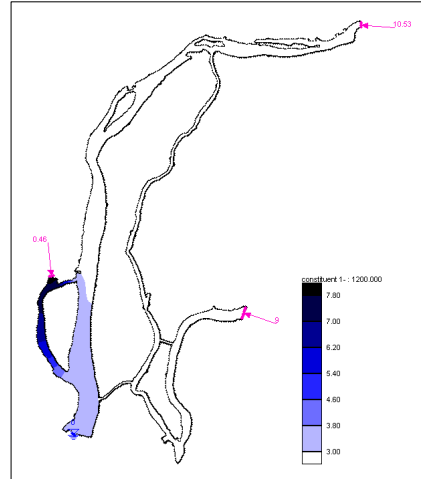


그림 11. MDDJ-6에 대한 BOD 농도 예측결과 (50일 후)

3.5 주요 지점 준설 효과 검토

오염된 퇴적토의 준설에 의한 수질개선효과 검토를 위한 수치모의조건은 서낙동강, 평강천, 맥도강 전체에 수질개선 효과가 나타나는 표 4의 조건(MDDJ) 중에서 MDDJ-1, MDDJ-3, MDDJ-5을 사용하였다. RMA4 모형의 경우 바닥에서 용출되는 현상을 고려할 수 있는 방법이 없지만, 이 연구에서는 용출현상에 의해 증가되는 농도를 초기조건에 모의기간별로 반영하고, 각각의 초기 BOD 농도에 대해 해당 모의기간에 대해 수치모의하는 방법을 사용하였으며, 이 방법을 사용한 기존의 연구 사례는 발견하지는 못하였다. 이 방법은 용출이 전체적인 영역에서 발생한다는 가정, 그리고 용출의 지속성을 정확하게 반영할 수 없다는 한계는 있지만, 수리학적 모형을 사용한 적용상의 변명으로써의 가치는 충분하다고 판단된다.

오염된 하상에서 용출되는 BOD 용출률 BOD_{flux} 은 2008년과 2009년에 서낙동강, 평강천, 맥도강에서 조사한 값인 $46.7 \text{ mg/m}^2/\text{d}$ 를 사용하였다. 모의시간 T_{day} 동안 하상으로부터 용출된 BOD 농도 C_{add} 는 다음 식 (5)와 같이 계산할 수 있다.

$$C_{add} = \frac{(BOD_{flux})(A_{bed})(T_{day})}{(Volume)} \quad (5)$$

여기서 A_{bed} 는 하상의 면적(수표면의 면적을 사용), $Volume$ 은 EL. 0.0 m를 기준으로 한 서낙동강, 평강천, 맥도강 수체의 체적이다.

이 연구에서는 주어진 수치모의 기간 동안 하상에서 용출된 BOD 부하량을 초기 BOD 농도에 더한 값을 초기조건으로 설정하는 방법을 사용하였다. 따라서, 모의기간별 초기

BOD 농도 C_{init} 는 다음 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$C_{init} = C_0 + C_{add} \quad (6)$$

여기서 C_0 는 용출을 고려하지 않을 경우의 초기농도이다. 식 (5)와 (6)을 이용하여 용출을 고려할 경우의 초기 BOD 농도를 모의기간별로 구한 값을 표 5에 정리하였다.

BOD 농도장에 대한 평면적 예측결과로부터 오염된 하상 토 준설의 효과를 분석하는 것은 거의 불가능하기 때문에 농도장 분포도는 도시하지 않았다. 준설에 의한 수질개선효과 분석은 그림 3에 표시된 6개의 지점 중 서낙동강, 평강천, 맥도강을 대표하는 지점을 하나씩 선택하여, 강동교(Point-1), 울만교(Point-5), 맥도강(Point-6) 지점에 대해 분석하였다.

그림 12는 서낙동강에 위치한 강동교 지점의 수문운영 경과시간에 대한 BOD 농도를 3가지 모의조건에 대하여 준설 전후로 구분하여 도시한 것이다. MDDJ-1의 경우 평균적인 50일 후의 BOD 농도는 준설전이 3.88 mg/L, 준설 후가 3.52 mg/L로 9.24%(준설전 농도에서 준설후 농도를 빼서 준설전 농도로 나눈 값)의 개선효과가 있는 것으로 나타났으며, MDDJ-3의 경우 평균적인 50일 후의 BOD 농도는 준설전이 2.97 mg/L, 준설 후가 2.97 mg/L로 0.00%의 개선효과가 있는 것으로 나타났고, MDDJ-5의 경우 평균적인 50일 후의 BOD 농도는 준설전이 2.96 mg/L, 준설 후가 2.96 mg/L로 0.00%의 개선효과가 있는 것으로 나타났다. 그림 12를 보면 준설을 할 경우 초기에는 준설에 의한 수질개선효과가 나타나지만, 수체 교환을 지속적으로 수행할 경우 그 효과는 점차 감소함을 알 수 있다.

그림 13은 평강천에 위치한 울만교 지점의 수문운영 경과시간에 대한 BOD 농도를 3가지 모의조건에 대하여 준설

표 5 용출을 고려한 초기 BOD 농도

모의기간 (day)	C_{add} (mg/L)	C_0 (mg/L)	C_{init} (mg/L)	모의기간 (day)	C_{add} (mg/L)	C_0 (mg/L)	C_{init} (mg/L)
5	0.077	7.96	8.037	55	0.844	13.96	8.804
10	0.153	7.96	8.113	60	0.920	14.96	8.880
15	0.230	7.96	8.190	65	0.997	15.96	8.957
20	0.307	7.96	8.267	70	1.074	16.96	9.034
25	0.384	7.96	8.344	75	1.151	17.96	9.111
30	0.460	8.96	8.420	80	1.227	18.96	9.187
35	0.537	9.96	8.497	85	1.304	19.96	9.264
40	0.614	10.96	8.574	90	1.381	20.96	9.341
45	0.690	11.96	8.650	95	1.457	21.96	9.417
50	0.767	12.96	8.727	100	1.534	22.96	9.494

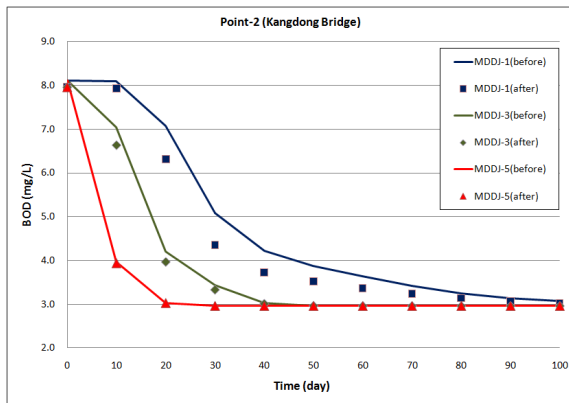


그림 12. 준설 전후 강동교 지점 BOD 변화

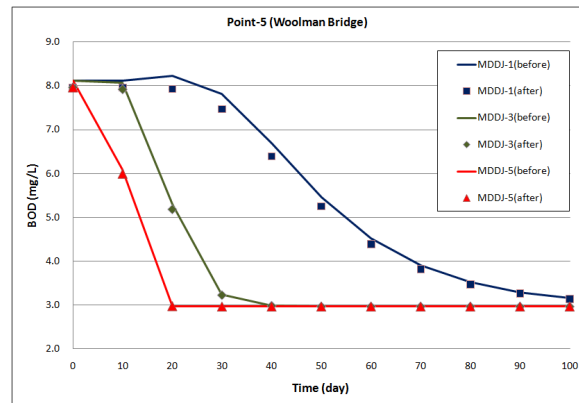


그림 13. 준설 전후 울만교 지점 BOD 변화

전후로 구분하여 도시한 것이다. MDDJ-1의 경우 평균적인 20일 후의 BOD 농도는 준설전이 5.46 mg/L, 준설 후가 5.25 mg/L로 3.74%(준설전 농도에서 준설후 농도를 빼서 준설전 농도로 나눈 값)의 개선효과가 있는 것으로 나타났으며, MDDJ-3의 경우 평균적인 50일 후의 BOD 농도는 준설전이 2.96 mg/L, 준설 후가 2.96 mg/L로 0.00%의 개선효과가 있는 것으로 나타났고, MDDJ-5의 경우 평균적인 50일 후의 BOD 농도는 준설전이 2.96 mg/L, 준설 후가 2.96 mg/L로 0.00%의 개선효과가 있는 것으로 나타났다. 그림 13를 보면 준설을 할 경우 초기에는 준설에 의한 수질개선효과가 나타나지만, 수체 교환을 지속적으로 수행할 경우 그 효과는 점차 감소함을 알 수 있다.

그림 14는 맥도강 중앙 지점의 수문운영 경과시간에 대한 BOD 농도를 3가지 모의조건에 대하여 준설 전후로 구분하여 도시한 것이다. MDDJ-1의 경우 평균적인 50일 후의 BOD 농도는 준설전이 3.29 mg/L, 준설 후가 3.27 mg/L로 0.40%(준설전 농도에서 준설후 농도를 빼서 준설전 농도

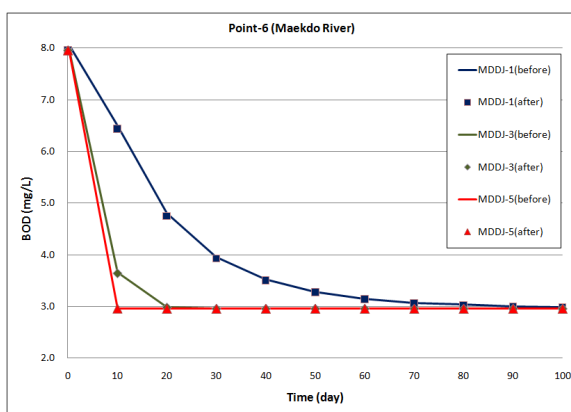


그림 14. 준설 전후 맥도강 지점 BOD 변화

로 나눈 값)의 개선효과가 있는 것으로 나타났으며, MDDJ-3의 경우 평균적인 50일 후의 BOD 농도는 준설전이 2.96 mg/L, 준설 후가 2.96 mg/L로 0.00%의 개선효과

가 있는 것으로 나타났으며, MDDJ-5의 경우 평균적인 50일 후의 BOD 농도는 준설전이 2.96 mg/L, 준설 후가 2.96 mg/L로 0.00%의 개선효과가 있는 것으로 나타났다. 그림 14를 보면 준설을 할 경우 초기에는 준설에 의한 수질개선 효과가 나타나지만, 수체 교환을 지속적으로 수행할 경우 그 효과는 점차 감소함을 알 수 있다.

4. 결 론

서낙동강, 평강천, 맥도강의 하상에 퇴적되어 있는 오염된 토사를 제거할 경우 준설이 수질개선에 기여하는 정도를 RMA4 모형을 사용하여 검토하였으며, 준설 영향에 대한 수치모델링 결론을 정리하면 다음과 같다.

- 1) RMA4 모형의 경우 바닥에서 용출되는 현상을 고려할 수 있는 방법이 없기 때문에, 용출현상에 의해 증가되는 농도를 초기조건에 모의기간별로 반영하고, 각각의 초기 BOD 농도에 대해 해당 모의기간에 대해 수치모의하는 방법을 사용하였다.
- 2) 오염된 퇴적토의 준설에 의한 수질개선효과 검토를 위한 수치모의조건은 서낙동강, 평강천, 맥도강 전체에 수질개선효과가 나타나는 조건 중에서 MDDJ-1, MDDJ-3, MDDJ-5를 사용하였으며, 서낙동강, 평강천, 맥도강을 대표하는 지점으로써 강동교, 울만교, 맥도강 지점에 대해 분석하였다.
- 3) 대저수문에서 3.0 m³/s, 맥도수문에서 1.0 m³/s를 유입시키는 경우에 강동교, 울만교, 맥도강 지점에 대한 50일 후의 평균 수질개선효과는 3.08%로 나타났으며, 대저수문에서 6.0 m³/s, 맥도수문에서 3.0 m³/s를 유입시키는 경우에 강동교, 울만교, 맥도강 지점에 대한 50일 후의 평균 수질개선효과는 1.25%로 나타났다. 대저수문에서 13.0 m³/s, 맥도수문에서 6.0 m³/s를 유입시키는 경우에 강동교, 울만교, 맥도강 지점에 대한 50일 후의 평균 수질개선효과는 0.13%로 나타났다.
- 4) 서낙동강, 평강천, 맥도강의 하상에 퇴적되어 있는 오염된 토사를 제거할 경우 준설이 수질개선에 기여하는 정도는 최대 10.0% 이하의 범위에 있을 것으로 판단되며, 준설을 할 경우 초기에는 준설에 의한 수질개선효과가 나타나지만, 수체 교환을 지속적으로 수행할 경우 그 효과는 점차 감소함을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- 낙동강공동체 (2004) 낙동강생명찾기 백서-흐름, 인쇄물.
- 부산광역시 건설본부 (2004) 녹산배수펌프장건설공사 보고서.
- 부산지방국토관리청 (2001) 서낙동강하천정비기본계획 서낙동강 (보완), 평강천, 맥도강, 건설교통부.
- 서낙동강유역관계기관합동 (2005) 철새들의 낙원 서낙동강 수질 개선 종합대책.
- 이금찬, 윤영삼, 이남주 (2009) RMA2/RMA4 모형을 이용한 서낙동강 수문연계운영의 수질개선 효과 예측, 한국환경과학회지, 제18권, 제9호, pp. 971-981.
- 이남주, 김영도, 권재현, 신찬기 (2007) 수문운영에 따른 서낙동강 수질변화에 관한 이차원 수치모의, 상하수도학회지, 21(1), pp. 101-112.
- 이남주, 류시완, 신찬기 (2006) 수문운영을 통한 정체수역 수질개선에 관한 연구, 한국수처리학회지, 14(4), pp. 69-76.
- 이남주, 이상호, 류권규, 김일규, 황인성 (2009) 서낙동강 유역 오염도 현황분석 및 수질개선방안 수립, 낙동강수계관리위원회.
- 이남주, 이상호, 류권규, 김일규, 황인성, 신원식, 권대영, 박재현, 김영훈 (2008) 서낙동강 유역 오염도 현황분석 및 수질개선방안 수립, 낙동강수계관리위원회.
- 황경엽, 박성열, 백원석, 정제호, 김영훈, 신원식, 이남주, 황인성 (2007) 낙동강 퇴적물 내 중금속 존재 형태 및 용출 가능성, 상하수도학회지, 21(1), pp. 113-122.
- Norton, W. R., King, I. P., and Orlob, G. T. (1973) A finite element model for lower granite reservoir. US Army Corps of Engineers, Walla Walla district, Walla Walla Washington.
- US Army Corps of Engineers (1996) Users Guide to RMA2 Version 4.3. WexTech Systems, Inc.