서낙동강 호소형 하천의 수질 개선 방안에 대한 비교 분석

Comparison and Analysis for Water Quality Improvement Alternatives of the Seonakdonggang

강태욱* · 이상호**

Kang, Taeuk · Lee, Sangho

Abstract

The water in the Seonakdonggang is commonly stagnant by the gates located on the upstream and downstream ends. The water quality of that river is degraded. The purpose of the study is to quantitatively evaluate alternatives for water quality improvement of the Seonakdonggang. We simulated flow rate and water quality for tributaries and main stream of the Seonakdonggang. The SWMM (storm water management model) was used to simulate the flow rate and water quality for the tributaries of the Seonakdonggang and an artificial neural network was employed to estimate chlorophyll-a and dissolved oxygen as it is difficult to simulate them for their tributaries by the SWMM. WASP (water quality analysis simulation program) was used to simulate water quality of the Seonakdonggang. All the models were calibrated with observed data. Alternatives for water quality improvement of the Seonakdonggang are reduction of pollution load from the tributaries, constant water supply for instream flow by operation of the gates, and dredging of the river bed. The assessment results showed that constant water supply by operation of the gates is the most effective for water quality improvement of the Seonakdonggang.

Key words : Seonakdonggang, water quality improvement, SWMM, WASP

요 지

서낙동강은 상·하류에 위치한 수문에 의해 정체된 호소형 하천으로서 수질이 저하되어 있다. 본 연구는 서낙동강의 수질 개선을 위한 여러 대안을 정량적으로 평가하는데 목적이 있다. 이를 위해 서낙동강의 지류와 본류 구간의 유량과 수질모의를 수행하였다. 서낙동강 지류의 유량과 수질모의에는 SWMM을 이용하였고, SWMM으로 모의가 어려운 클로로필a와 용존 산소는 인공신경망으로 추정하였다. 그리고 서낙동강 본류의 수질모의에는 WASP를 이용하였다. 각각의 모형은 측정된 자료를 통해 보정되었다. 서낙동강의 수질 개선을 위한 대안은 지류의 오염부하량 저감, 수문 운영을 통한 하천유지용수의 공급, 하상토의 준설로 설정하였다. 각각의 수질 개선 방안을 검토한 결과, 수문 운영을 통해 서낙동강에 물이 상시 흐르도록 하는 방안이 가장 효과적인 것으로 분석되었다.

핵심용어 : 서낙동강, 수질 개선, SWMM, WASP

1. 서 론

서낙동강은 상류에 위치한 대저수문과 하구에 위치한 녹산수문으로 인해 정체 수역이 형성되는 전형적인 호소형 하천이다. 서낙동강이 인위적인 호소형 하천으로 운영된 것은 녹산수문을 통해 바다로부터 염수 침입을 막고, 대저수문에서 들어오는 담수를 조절해 농업에 필요한 수자원을 확보함으로써 김해평야를 곡창화하기 위함이다. 하지만 현재의 서낙동강 수환경은 매우 악화되어 있어 용수 사용에 제약이 되고 있다. 서낙동강의 수질 악화 원인은 수문에 의한 유수의 정체, 장

기간 오염물질의 퇴적, 유역 개발 및 도시화에 따른 오염 부하량의 증가 등 복합적이다. 본 연구의 목적은 서낙동강의 수질 개선을 위해 실행 가능한 여러 대안에 대하여 수질 개선의 정도를 정량적으로 평가하는데 있다.

하천 또는 호소의 수질 개선을 목적으로 수행된 과거 연구 사례로서 Lee et al.(2005)은 RMA2, RMA4, QUALKO 등의 수치모의 모형을 이용하여 서낙동강의 대저수문과 녹산수문의 운영에 따른 수질 개선의 정도를 개략적으로 평가하였다. 유사하게 Kang et al.(2007)은 서낙동강의 대저수문을 통한 취수량과 서낙동강의 수질을 과거 측정자료로부터 분석하

*정회원. 부경대학교 토목공학과 박사 후 연구원(E-mail: ktw62@hanmail.net)
Post Doctor, Department of Civil Engineering, Pukyong National University

**교신저자. 정회원. 부경대학교 토목공학과 교수(Tel: +82-51-629-6076, Fax: +82-51-629-6063, E-mail: peterlee@pknu.ac.kr)
Corresponding Author. Member. Professor, Department of Civil Engineering, Pukyong National University

여 대저수문과 하류의 녹산수문의 운영에 따른 수질 개선의 가능성을 제시한 바 있다. 그리고 Shin et al.(2008)과 Seo and Lee(2005)는 각각 부남호와 평택호를 대상으로 수치모의를 수행하여 준설에 의한 수질 개선의 정도를 제시한 바 있다.

상기의 선행 연구들을 포함하여 많은 연구들은 하천 또는 호소의 수질모의에 유역으로부터 발생하는 오염 부하량을 고려하지 않거나 일부의 관측기록을 토대로 단순화하여 처리하였다. 또한, 서낙동강과 같은 호소형 하천에 대한 수질 개선을 평가한 대부분의 연구들에서는 하구에 위치한 수문의 실제 조작을 고려한 사례를 찾아보기 어렵다. 즉, 하류단 경계 조건에 대하여 명확히 제시하지 않은 연구들이 대부분이다.

본 연구에서는 서낙동강에 대하여 보다 정확한 수질모의를 위해 서낙동강으로 유입되는 지류 하천에 대한 유량과 수질을 모의하였고, 서낙동강 하구에 위치한 녹산수문의 운영 실적을 고려하여 수질모의를 수행하였다. 연구에서는 서낙동강 지류 하천과 유역에 대한 유량 및 수질모의에 SWMM(storm water management model)을 이용하였고, SWMM으로 추정 이 어려운 클로로필a(chlorophyll-a)와 용존 산소(dissolved oxygen; DO)는 인공신경망(artificial neural network; ANN)으로 추정하였다. 그리고 서낙동강 본류 구간의 수질모의에는 WASP(water quality analysis simulation program)을 활용하였다. 또한, 녹산수문의 운영에 따라 호소 또는 하천으로 변화하는 서낙동강의 특성을 고려하였다. 지류 하천과 서낙동강 본류에 대한 유출 및 수질모의 모형은 측정된 관측자료를 통해 보정되었다. 최종적으로 보정된 모형을 이용하여 유역의 오염부하량 저감, 서낙동강의 상·하류에 위치한 수문의 운영을 통한 하천유지용수의 공급, 하상토의 준설을 통한 서낙동강의 수질 개선 정도를 정량적으로 평가하였다.

2. 연구 방법

2.1 대상 유역

본 연구의 대상 유역은 서낙동강 유역으로서 유역면적은 303.09 km²이다. 유역 내에 국가하천인 서낙동강, 맥도강, 평강천이 위치하고 있고, 조만강, 예안천, 주중천, 신어천 등 15개의 지방하천이 있다. 이외에도 자연적으로 형성된 소하천과 농업용수 공급을 위한 농수로가 복잡하게 형성되어 있다. 수질모의 대상 하천인 서낙동강은 부산광역시 강서구 대저1동과 경상남도 김해시 대동면을 연결하는 대저수문을 지점으로 하고, 종점은 부산광역시 강서구 명지동과 녹산동을 연결하는 녹산수문으로서, 총 하천 길이는 18.55 km에 이른다.

Fig. 1은 서낙동강 유역의 경계, 주요 하천, 수문의 위치 등 유역 현황과 연구에서 서낙동강의 수질모의에 활용한 지류 및 본류 구간의 주요 수질 측정지점을 포함하고 있다. 국립환경과학원(National Institute of Environmental Research; NIER)에서는 서낙동강의 수질 관리를 위해 월 1회씩 주로 본류 구간의 수질측정을 수행하고 있다(Fig. 1의 '■' 표시). 본 연구에서는 이와 중복되지 않도록 서낙동강 지류 하천들에 대한 유량과 수질을 총 7회에 걸쳐 측정하였다(Fig. 1의 '●' 표시).

Fig. 1. Study area including the Seonakdonggang

2.2 서낙동강의 수질모의 방법

2.2.1 지류 유역의 유출 및 수질모의 방법

서낙동강 본류 구간의 수질모의를 위해서는 서낙동강으로 유입되는 지류 하천의 유량 및 수질에 대한 정보가 필요하다. 연구에서는 서낙동강으로 유입되는 주요 하천에 대한 유량 및 수질모의를 위해 미 환경보존국(Environmental Protection Agency)에서 제공하고 있는 SWMM(Rossman, 2009)을 이용하였다. SWMM에 의해 모의된 주요 수질인자는 BOD(biochemical oxygen demand), COD(chemical oxygen demand), TN(total nitrogen), TP(total phosphorus), SS(suspended solid)이다.

본 연구에서는 서낙동강 지류 유역의 유량과 수질을 모의하기 위해 지하수 유출 모듈을 포함한 유역유출 연속모의(watershed runoff continuous simulation)를 수행하였는데, 구성된 세부 사항은 다음과 같다. 우선, 유역 추적에는 비선형 저류방정식을 이용하였고, 하도 추적은 대상 하천과 관거의 특징에 따라 운동파(kinematic wave) 추적과 동역학과(dynamic wave) 추적을 선별하여 적용하였다. 모의기간은 2007년 6월 29일부터 10월 29일까지로서 4개월이고, 시간 단위로 모의하였다. 모의에 필요한 강우 및 증발량 자료는 서낙동강 유역과 인접한 김해공항기상대의 측정 자료를 이용하였다. Fig. 2는 서낙동강의 주요 지류 하천 유역에 대한 유출모식 체계를 나타낸다.

한편, SWMM으로는 하천의 주요 수질 인자인 클로로필a와 DO를 모의하는데 한계가 있다. 즉, 해당 수질인자는 생물 화학적 인자이므로 오염물질의 축적(build up)과 쓸림(wash off) 현상을 수학적으로 정의하여 수질을 모의하는 SWMM으로 모의되기 어렵다. 이에 따라 연구에서는 인공신경망을 이용하여 서낙동강 지류 하천의 클로로필a와 DO를 추정하였다. 이때, 인공신경망의 학습자료로서 Fig. 1의 국립환경과학원에서 관리하는 수질 측정자료를 이용하였다. 즉, 서낙동강 본류의 클로로필a 또는 DO와 타 수질인자의 관계를 이용하여 지류 하천의 클로로필a와 DO를 추정한 것이다. 서낙동강 지류 하천에 대한 클로로필a의 추정에 관한 구체적인 방법은 Kang et al.(2011)을 참고할 수 있다.

Fig. 2. Schematic diagrams of watershed runoff simulation

2.2.2 본류의 수질모의 방법

서낙동강의 하류에는 녹산수문이 위치하고 있다. 녹산수문은 평상 시에 수문을 닫음으로써 하류 바닷물의 역류를 막아 인근 지역의 각종 용수 공급에 기여하고 있고, 홍수 시에는 수문을 개방하여 홍수 조절을 수행하고 있다. 또한, 수문 외측의 조위가 낮을 경우에는 상류의 대저수문과 연계하여 서낙동강의 수체 교환을 통한 수질 개선을 도모하고 있다. 즉, 서낙동강은 녹산수문의 개폐에 따라 호수 또는 하천의 형태로 변화하게 된다.

본 연구에서는 서낙동강의 수질모의에 미 환경보존국에서 제공하고 있는 WASP(Wool et., 2002)을 이용하였다. WASP은 하류단의 경계조건 설정에 따라 호수 또는 하천을 모의할 수 있는 모형이지만, 시간에 따라 두 가지 형태로 변화하는 현상을 모의할 수는 없다. 본 연구에서는 WASP으로 녹산수문의 개폐 조건을 고려하기 위해 모형을 기간에 따라 분할하였다. 즉, Fig. 3의 (a)와 같이 녹산수문이 개방되고 닫힘에 따라 모형의 수행을 분할하였다. 이러한 모의를 수행할 경우, 현재 기간 끝의 모의 결과는 다음 기간의 초기조건으로 입력하여 수행된다.

WASP에 의한 수질모의는 하도 구간(segment)을 구분하여 수행된다. 연구에서는 서낙동강으로 유입되는 지류 하천과 서

서낙동강 호소형 하천의 수질 개선 방안에 대한 비교 분석

낙동강 본류의 수질 관측 지점을 고려하여 Fig. 3의 (b)와 같이 하도 구간을 분할하였다.

2.3 서낙동강의 수질모의를 위한 주요 입력자료

2.3.1 서낙동강 유역의 수문자료

전 절에서 기술한 바와 같이 서낙동강의 시점과 종점에 위치한 대저수문과 녹산수문은 홍수조절 또는 서낙동강의 수질 개선을 목적으로 운영된다. 본 연구에서는 두 수문의 운영을 반영한 수질모의를 수행하기 위해 모의 기간인 2007년 6월 29일부터 10월 29일까지 두 수문의 개폐 현황을 조사하였다 (Table 1).

부산광역시 강서구청은 대저수문의 개폐 시기만을 관리하고 있고, 대저수문을 통한 유입수의 유량과 수질에 대한 정보는 측정하거나 관리하지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 대저수문을 통해 유입되는 유량과 수질을 추정하기 위해 2008년에 대저수문에서 자체 측정한 유량 자료와 대저수문과 인접한 구포 지점의 낙동강 수질을 이용하였다.

본 연구에서는 대저수문의 개방 시 유량을 2회에 걸쳐 5번씩 측정하였고, 평균 유량은 $120.57 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 분석되었다. 그리고 국립환경과학원에서는 구포 지점의 수질을 월 1회씩 측정하고 있는데, 본 과업에서 수행한 모의 기간 중 대저수문을

(a) Simulation method considering operation of the Noksan Gate (b) Division of segments for water quality simulation of the Seonakdonggang

Fig. 3. Water quality simulation method of the Seonakdonggang

Table 1. Operations of the Daejeon Gate and the Noksan Gate

순번	대저 수문				녹산 수문			
	개문 시간		폐문 시간		개문 시간		폐문 시간	
1					2007-07-10	08:30	2007-07-10	11:50
2					2007-07-13	00:50	2007-07-13	03:10
3					2007-07-27	12:35	2007-07-27	13:35
4					2007-08-15	16:00	2007-08-15	17:30
5					2007-09-14	15:30	2007-09-14	17:00
6					2007-10-08	11:00	2007-10-08	15:00
7	2007-10-10	10:00	2007-10-10	15:00	2007-10-10	00:30	2007-10-10	03:00
8	2007-10-10	21:00	2007-10-11	03:00	2007-10-10	13:00	2007-10-10	15:30
9	2007-10-11	13:00	2007-10-11	17:00	2007-10-11	00:30	2007-10-11	03:10
10					2007-10-11	13:20	2007-10-11	16:30
11	2007-10-12	00:00	2007-10-12	04:00	2007-10-12	01:10	2007-10-12	04:20
12	2007-10-12	10:00	2007-10-12	15:00	2007-10-12	13:40	2007-10-12	16:40
13	2007-10-12	23:00	2007-10-13	05:00	2007-10-13	01:30	2007-10-13	04:40
14	2007-10-13	11:00	2007-10-13	16:00	2007-10-13	14:15	2007-10-13	17:15
15	2007-10-13	23:00	2007-10-14	05:00	2007-10-14	02:30	2007-10-14	05:00
16	2007-10-14	10:00	2007-10-14	16:00	2007-10-14	14:40	2007-10-14	17:30
17	2007-10-14	21:00	2007-10-15	01:00	2007-10-15	03:10	2007-10-15	06:10
18					2007-10-23	11:30	2007-10-23	12:40
19					2007-10-25	12:15	2007-10-25	15:15
20					2007-10-29	15:45	2007-10-29	17:20

Table 2. Water quality for the Gupo Station on Oct. 2007

수질 항목 관측 지점	암모니아성 질소 (mg/L)	질산성 질소 (mg/L)	유기 질소 (mg/L)	인산염 인 (mg/L)	유기 인 (mg/L)	클로로필a (ug/L)	DO (mg/L)	BOD (mg/L)
구포 지점	0.087	1.969	0.587	0.044	0.056	23.5	7.5	1.6

통한 낙동강 물의 유입은 2007년 10월에만 이루어졌기 때문에 구포 지점에서 2007년 10월에 측정된 수질을 대저 수문을 통한 유입수의 수질로 설정하였다(Table 2).

2.3.2 서낙동강 유역의 기상자료

WASP에 요구되는 기상 입력 자료는 기온($^{\circ}\text{C}$), 일조율(무차원), 일사량(cal/cm^2), 풍속(m/s)이다. 본 연구에서는 시간 단

위의 수질모의를 위해 시간 단위의 기온이 측정되어 있는 부산지방기상청의 자료를 사용하였다. Fig. 4는 WASP에 사용된 부산지방기상청의 기상자료를 나타낸 그림이다.

2.3.3 퇴적물 조사

연구에서는 퇴적물로부터 용출되는 영양염(nutrient)과 퇴적물의 산소요구량(sediment oxygen demand; SOD)을 실험을

Fig. 4. Atmospheric data for the Seonakdonggang Basin

Table 3. Nutrient and SOD for the segments

하도 구간		NH ₃ -N (mg/m ² ·day)		PO ₄ ³ -P (mg/m ² ·day)		SOD (g/m ² ·day)
		호기성	혐기성	호기성	혐기성	
1	녹산 수문~평강천 합류점 직하류	0.9316	18.070	0.969	6.110	1.234
2	평강천 합류점 직상류~조만강 합류점 직하류	0.8220	15.950	0.855	5.391	1.276
3	조만강 합류점 직상류~서낙동강교	0.8220	15.950	0.855	5.391	2.035
4	서낙동강교~강동교	0.7124	13.820	0.741	4.672	1.454
5	강동교~신어천 합류점 직하류	0.1534	18.560	0.675	5.400	0.9595
6	신어천 합류점 직상류~김해교	0.1534	18.560	0.675	5.400	1.395
7	김해교~주중천 합류점 직하류	0.1534	18.560	0.675	5.400	2.117
8	주중천 합류점 직상류~예안천 합류점 직하류	1.0740	15.190	1.043	5.277	0.8648
9	예안천 합류점 직상류~대저 수문	0.4602	6.510	0.447	2.262	0.7784

통해 분석하였고, 이를 수질모의 모형에 반영하였다. 퇴적물의 영양염 용출실험은 암모니아성 질소와 인산 인에 대해 수행하였다. 실험은 호기성과 혐기성 상태로 각각 수행하였고, 31일 동안 측정된 결과를 평균하여 각각의 용출량을 분석하였다. 그리고 하도 구간별 용출 가능 면적을 추정하여 이를 반영한 퇴적물의 영양염 용출량을 산정하였다. 한편, 퇴적물 산소요구량은 실험 초기에 소모되는 산소의 양으로 하였다.

Table 3은 용출 가능면적이 고려된 하도 구간별 영양염 용출량과 퇴적물 산소요구량을 나타낸다. 서낙동강의 수질모의 시, 녹산수문이 개방되어 있을 때는 호기성 영양염 용출량을 적용하였고, 녹산수문이 폐쇄되어 있는 경우에는 혐기성 상태의 영양염 용출량을 적용하였다. 그리고 퇴적물 산소요구량의 경우에는 모의 전 기간에 대하여 동일하게 적용하였다.

2.3.4 지형자료와 수리계수

WASP을 이용한 수질모의를 위해서는 분할된 하도 구간에 대한 지형자료와 수리계수가 입력되어야 한다. 본 연구에서는 Ministry of Construction & Transportation(2001)의 자료를

활용하여 하도 구간의 지형자료(체적, 길이, 폭, 경사, 조도계수)를 결정하였다. WASP에 입력되는 수리계수는 하도 구간의 유속, 수심, 하폭을 유량에 관한 회귀식으로 산정하여 입력된다(Eqs. (1)~(3)). Eq. (4)는 각 회귀식에 사용된 계수의 곱($a \cdot c \cdot e$)과 지수의 합($b+d+f$)이 각각 1이 되는 것을 설명하는 수식이다. 즉, 유속-유량, 수심-유량만의 관계만을 정의하면, 하폭-유량의 회귀식에서 계수(e)와 지수(f)가 결정되므로 WASP에서는 a, b, c, d 의 값만이 입력된다.

$$V = aQ^b \quad (1)$$

$$D = cQ^d \quad (2)$$

$$B = eQ^f \quad (3)$$

$$Q = V \cdot A = V \cdot D \cdot B = (aQ^b) \cdot (cQ^d) \cdot (eQ^f) \\ = (a \cdot c \cdot e)Q^{b+d+f} \quad (4)$$

상기의 Eqs. (1)~(4)에서 Q 는 유량, V 는 유속, D 는 수심, B 는 하폭을 나타낸다.

(a) Flow-velocity relation

(b) Flow-depth relation

Fig. 5. Estimation of hydraulic discharge coefficients for the segment 1

Table 4. Geometry information and hydraulic discharge coefficient for the segments

하도 구간	체적 (m³)	길이 (m)	폭 (m)	경사	바닥 조도 계수	유속 계수 (a)	유속 지수 (b)	수심 계수 (c)	수심 지수 (d)
1 녹산 수문~ 평강천 합류점 직하류	4,161,000	1,200	361	0.000189	0.025	0.001009	0.83561	4.9350	0.08644
2 평강천 합류점 직상류~ 조만강 합류점 직하류	2,432,200	800	356	0.000208	0.025	0.001257	0.82041	4.1837	0.09560
3 조만강 합류점 직상류~ 서낙동강교	6,689,700	2,990	368	0.000233	0.025	0.002200	0.77175	2.0581	0.15492
4 서낙동강교~ 강동교	6,254,800	3,120	324	0.000313	0.025	0.002201	0.77646	2.2218	0.15267
5 강동교~ 신어천 합류점 직하류	4,882,800	2,850	263	0.000313	0.025	0.002602	0.77296	2.4638	0.14641
6 신어천 합류점 직상류~ 김해교	1,889,900	1,290	191	0.000370	0.025	0.004276	0.75566	1.8547	0.17721
7 김해교~ 주중천 합류점 직하류	1,868,100	1,810	132	0.000370	0.027	0.006276	0.72894	2.3991	0.15867
8 주중천 합류점 직상류~ 예산천 합류점 직하류	3,814,300	2,780	236	0.000400	0.027	0.006386	0.63891	1.8701	0.18728
9 예산천 합류점 직상류~ 대저 수문	2,115,500	2,010	110	0.000400	0.027	0.007566	0.70017	2.4970	0.16703

수리계수의 추정에는 실측자료를 이용하거나 수치 모형을 이용하여 산정할 수 있다. 연구에서는 Ministry of Construction & Transportation(2001)의 HEC-RAS 입력자료를 이용하여 서낙동강의 수리계수를 추정하였다. 수리계수의 추정에는 1.58, 50, 80, 100, 150, 200년 빈도에 대한 유량, 수심, 유속이 사용되었다. Fig. 5는 하도 구간 1에 대한 수리계수 산정 회귀식을 추정한 그림이다. 그리고 Table 4는 하도 구간

별로 추정한 지형자료와 수리계수를 나타낸 표이다.

3. 연구내용

3.1 서낙동강 지류 유역의 유출 및 수질모의

3.1.1 SWMM에 의한 유역유출 모의와 수질모의

SWMM으로 구성된 서낙동강의 6개 지류 유역에 대하여

(a) Model calibration for flow rate of the Sineocheon

(b) Model calibration for flow rate of the Jomangang (Haebancheon)

(c) Model calibration for water quality of the Pyeonggangcheon (upper reach)

Fig. 6. The simulation results for flow rate and water quality in major tributaries

Table 5. Relative errors between measured and simulated data by the SVMM

하천		유량 오차(%)	수질 오차(%)				
			BOD	COD	TN	TP	SS
예안천		35.9	52.8	32.9	38.7	54.1	42.2
신어천		24.6	43.5	34.4	29.8	34.4	39.4
주중천		26.7	53.7	22.0	27.2	34.2	31.2
조만강	상류의 해반천	28.3	53.8	35.9	53.8	51.3	45.0
	하구	-	46.7	40.2	47.4	50.7	55.3
지사천		-	54.5	27.0	47.7	38.1	44.3
평강천	상류	39.3	-	-	-	-	-
	하류	20.3	28.2	26.0	42.5	30.7	52.3

구성된 유량 및 수질모의 모형은 실제 측정된 유량, 수질자료에 의해 보정되었다. Fig. 6은 보정된 결과를 일부의 하천에 대하여 나타낸 그림이다. Fig. 6의 (a)와 (b)는 각각 신어천과 조만강의 지류인 해반천의 유량 모의 결과를 나타낸 그림이다. 신어천의 경우 건기의 유량이 비교적 오차가 작은 것을 볼 수 있고, 해반천의 경우 홍수 시 모의 결과가 우수한 것을 확인할 수 있다. Fig. 6의 (c)는 상대적으로 수질모의 결과가 양호하게 나타난 평강천의 모형 보정 결과이다. Table 5는 모의된 6개 하천에 대한 유량, 수질인자에 대한 모의값과 측정값의 상대오차(relative error)를 제시한 표이다. 유량의 상대오차는 약 20~40%로 나타났고, 수질인자는

25~55%의 상대오차를 갖는 것으로 분석되었다.

3.1.2 인공신경망을 이용한 클로로필a와 DO의 추정

서낙동강 지류 하천의 클로로필a와 DO를 추정하기 위해 인공신경망을 이용하였다. 신경망 모형은 사용된 학습자료의 구성에 따라 상이한 결과를 보인다. 따라서 본 연구에서는 조만강의 클로로필a와 DO를 대상으로 학습인자에 따른 신경망 모형의 추정치와 관측치를 비교 검토하였다. 그리고 평균 제곱 오차의 제곱근(root mean square error; RMSE)이 최소가 되는 학습인자 조합을 검토하였다(Table 6). 그 결과, 클로로필a는 BOD, COD, TN, TP, 기온을 학습인자로 설정

Table 6. Chlorophyll-a and DO estimation by learning data combinations

추정 인자	학습 인자	RMSE (mg/)	비 고	추정 인자	학습 인자	RMSE (mg/L)	비 고
Chl-a	BOD, TN, TP	23.2		DO	BOD	1.71	
	TN, TP, 기온	19.6			BOD, 기온	1.45	채택
	BOD, TN, TP, 기온	20.5			BOD, TN, TP	1.91	
	COD, TN, TP, 기온	24.6			BOD, SS, 기온	2.10	
	BOD, TN, TP, SS, 기온	23.3			BOD, TN, TP, SS	2.37	
	COD, TN, TP, SS, 기온	22.1			BOD, TN, TP, 기온	1.99	
	BOD, COD, TN, TP, 기온	16.9	채택		BOD, TN, TP, SS, 기온	2.50	
	BOD, COD, TN, TP, SS, 기온	25.1

Fig. 7. Estimation of chlorophyll-a and DO by the ANN

Table 7. Relative errors between measured and simulated data by the ANN

하천	상대 오차(%)		하천	상대 오차(%)	
	Chla	DO		Chla	DO
예안천	49.68	17.14	조만강	51.80	18.58
신어천	42.03	30.51	지사천	47.78	27.08
주중천	54.83	44.57	평강천	39.39	32.18

하고, DO는 BOD와 기온을 학습인자로 설정할 경우에 가장 좋은 결과가 나타났다.

Fig. 7과 Table 7은 인공신경망을 이용하여 서낙동강의 주요 지류 하천에 대한 클로로필a와 DO를 추정한 결과를 나타낸다. Table 7로부터 추정된 클로로필a와 DO는 각각 40~55%와 15~45%의 상대오차를 가지는 것으로 분석되었다.

3.2 서낙동강의 수질모의

상기의 지류 하천에 대한 유량 및 수질자료와 하도 구간 및 기상 자료를 WASP에 입력하여 서낙동강의 수질모의 모형을 구축하였다. 구축된 모형은 강동교와 김해교 지점에 대하여 보정되었다. 이때, 모형 보정에 활용된 측정자료는 국립환경과학원에서 2007년 7월부터 10월까지 월 1회씩 측정된 자료와 10월에 자체 측정된 자료이다.

Fig. 8은 강동교 지점의 BOD와 인산염 인의 보정 결과와 김해교 지점의 DO 및 질산성 질소의 보정결과를 나타낸다. 서낙동강에 대한 수질 측정자료가 많지 않아 모형의 정확도를 정량적으로 평가하기는 어렵지만, 대체로 각각의 계산된 수질인자는 관측값에 근사하고 있는 것을 볼 수 있다.

Fig. 8. The calibration results for water quality in the Seonakdonggang

3.3 서낙동강의 수질 개선을 위한 대안 평가

3.3.1 수질 개선을 위한 대안 수립

김해시는 서낙동강 유역의 효율적인 점오염원 처리를 위해 기존 하수처리장의 증설과 하수차집 관거의 신설 등을 통해 수질 개선을 도모하고 있다. Nakdong River Basin Environmental Office(2008)은 점오염원의 경우, 환경기초시설 설치 등으로 지속적으로 감소하고 있으나, 비점오염원은 토지이용의 고도화 등으로 인해 지속적으로 증가하고 있음을 지적하고 있다. 서낙동강의 이러한 현황과 기존의 연구들에서 검토된 바 있는 수질 개선 대안을 고려하여 수질 개선 시나리오를 구성하였다.

시나리오 1과 2는 지류 유역의 환경기초시설과 비점오염원 저감 대책 시설의 계획을 고려한 대안으로서, 유역의 오염 부하량을 각각 10%와 20% 저감시키는 방안이다. 이는 구체적인 유역의 오염 부하량 저감 계획을 반영하여 설정된 것이 아니라 유역의 오염 부하량 저감에 따라 기대할 수 있는 서낙동강의 수질 개선의 정도를 파악하기 위한 대안이다. 시나리오 3은 상류의 대저수문과 하류의 녹산 배수펌프장을 이용한 수질 개선 대안으로서, 대저수문에서 낙동강 물을 유입시

켜 연중 일정량 공급하고 하류의 녹산 배수펌프장에서 배수하는 방안이다. 이때, 하류의 녹산수문을 이용하지 않고 녹산 배수펌프장을 이용하는 것은 조위로 인해 녹산수문의 상시 개방이 제약을 받기 때문이다. 시나리오 3에서 대저수문을 통해 공급하는 수량은 과거 대저수문에서 연간 공급한 수량을 초 단위로 환산하여 설정($10 \text{ m}^3/\text{s}$)하였고, 수질은 Table 2에 제시한 구포지점의 수질을 이용하였다. 서낙동강의 상류에는 평강천으로 분기되는 지점이 있고, 이에 따라 대저수문을 통해 일정량 공급한다고 할지라도 전량 서낙동강으로만 유하될 가능성은 없다. 본 연구에서는 복잡한 현상을 통해 나타나는 유량 분기는 고려하지 않았으므로, 시나리오 3은 서낙동강으로 $10 \text{ m}^3/\text{s}$ 의 하천유지용수를 공급하는 대안으로 판단하는 것이 적절하다. 시나리오 4는 서낙동강의 하상에 퇴적된 퇴적물을 준설하는 경우에 대한 대안으로서 Table 3에 제시된 영양염 용출량과 퇴적물 산소요구량이 완전히 제거된다는 가정 하에서 분석되었다.

3.3.2 수질 개선 대안의 평가

보정된 서낙동강의 수질모의 모형을 이용하여 서낙동강의 수질 개선 대안을 평가하였다. Table 8은 각 시나리오에 대한 수질 항목별 평균 농도 감소율을 정리한 표이다. 수질 개선 검토 지점과 수질항목에 대하여 일부 차이가 있지만, 대체로 시나리오 3의 대저수문과 녹산 배수펌프장을 통해 하천 유지용수를 상시 공급하는 대안의 수질 개선 효과가 가장 높게 나타났다. 특히, 클로로필a와 BOD, TP의 수질 개선 효과가 두드러지는 것으로 분석되었다. 지류 유역의 오염 부하량을 각각 10%, 20% 삭감한 시나리오 1과 2의 경우, 각각 DO를 제외한 전체 수질 인자에 대하여 7~10%, 14~20%의 개선효과를 나타냈다. 즉, 지류의 오염 부하량 유입 저감률 정도에 해당하는 만큼 서낙동강의 수질 개선 효과가 나타나는 것을 알 수 있다. 퇴적토 준설의 효과를 모의한 시나리오 4에서는 클로로필a와 TP의 개선효과가 13~23%의 범위를 갖는 것으로 나타났고, 서낙동강 하구에서는 DO의 개선도 확

Table 8. Water quality improvement by the alternatives

시나리오	지 점	평균 농도 감소율(%)					비고
		Chl-a	DO	BOD	TN	TP	
1	지류 오염물 10% 삭감						
	김해교	7.03	-	9.51	8.87	7.19	
	강동교	7.06	-	9.52	8.85	7.28	
2	지류 오염물 20% 삭감						
	김해교	14.43	-0.01	18.98	17.59	14.09	
	강동교	14.43	-0.01	18.99	17.55	14.29	
3	하천유지용수의 공급						
	김해교	1.09	-0.43	34.35	-1.91	62.30	
	강동교	20.51	-0.27	29.95	-0.01	52.17	
4	준설						
	김해교	21.70	-0.72	0.97	3.49	22.28	
	강동교	20.09	-0.30	1.35	2.57	20.96	
	서낙동강 하구	13.79	-7.71	4.20	-3.32	13.45

(a) BOD

(b) Chl-a

Fig. 9. Water quality improvement by operation of the gates (scenario 3)

인할 수 있었다. Fig. 9는 수질 개선의 정도가 가장 큰 하천 유지용수의 공급에 의한 서낙동강 하구의 BOD와 클로로필a의 개선 정도를 나타낸 그림이다.

4. 결 론

본 연구에서는 호소형 하천인 서낙동강의 수질 개선을 위한 네 가지 대안에 대하여 예상되는 수질 개선의 정도를 모형을 통해 평가하였다. 우선, 서낙동강으로 유입되는 지류 하천의 유입수에 대한 유량과 BOD, COD, TN, TP, SS를 SWMM으로 모의하였다. SWMM으로 모의가 어려운 클로로필a와 DO는 인공신경망을 이용하여 추정하였다. 각각의 지류 하천에 대한 유량 및 수질모의 모형은 연구에서 직접 측정한 자료를 이용하여 보정되었다.

서낙동강 본류 구간의 수질모의는 WASP으로 수행하였고, SWMM과 인공신경망에 의해 추정된 지류 하천의 유입수와 최상류의 대저수문을 통해 유입되는 유입수를 고려하였다. 그리고 하구에 위치한 녹산수문의 개폐여부에 따라 하천 또는 호소로 변하는 현상을 모의하기 위하여 기간에 따라 구분하였다. 서낙동강 본류 구간에 대한 수질모의 모형은 국립환경과학원과 연구에서 직접 측정한 관측자료를 이용하여 보정되었다.

보정된 모형을 이용하여 서낙동강의 수질 개선 방안에 대한 평가를 수행하였다. 수질 개선을 위한 대안은 지류의 오염부하량을 각각 10, 20% 삭감하는 방안과 대저수문을 통해 10 m³/s를 연중 지속적으로 공급하고 녹산수문의 펌프시설을 이용하여 배수하는 방안, 하상토를 준설하는 것이다. 각각의 대안에 대한 평가 결과, 대부분의 지표에서 대저수문을 통해 상시 낙동강 물을 유입시키는 방안이 가장 수질 개선의 효과가 큰 것으로 분석되었다. 그리고 지류 오염 부하량을 저감할 경우, DO를 제외한 모든 수질인자에서 삭감된 오염 부하량에 해당하는 정도로 수질이 개선되는 것으로 분석되었다. 퇴적토 준설의 경우, 클로로필a와 총인의 개선 효과가 두드러졌고, 서낙동강의 하구에 대한 DO의 개선을 확인할 수 있었다.

본 연구는 호소형 하천인 서낙동강의 수질 개선 대안을 평가한 연구로서, 서낙동강을 비롯한 우리나라에 산재한 많은 호소형 하천의 수질 분석 방법과 수질 개선 방안 수립에 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다. 다만, 본 연구에서 제시된 서낙동강의 수질 개선 대안은 실현 가능성에 대한 구체적인 검토와 비용·편익과 관련된 요소들이 고려되지 못하였다. 따라서 보다 현실적인 서낙동강의 수질 개선 방안을 수립하기 위해서는 각각의 수질 개선 대안에 대한 다각적인 검토가 수반되어야 할 것이다.

감사의 글

이 논문의 내용은 부경대학교 자율창의학술연구비(2013년)에 의하여 연구되었습니다. 연구비를 지원해 주신 부경대학교에 심심한 감사의 뜻을 표합니다.

References

- Kang, D.H., Kim, Y.D., Kwon, J.H., and Lee, N.J. (2007) A Study on water quality management by flowrate control in reservoir-like river. *Proceedings of the 2007 Spring Co-Conference of the Korean Society on Water Environment and Korean Society of Water and Wastewater*, Korean Society on Water Environment and Korean Society of Water and Wastewater, pp. 1088-1091.
- Kang, T., Lee, S., Kim, I., and Lee, N. (2011) A study for estimation of chlorophyll-a in an ungauged stream by the SWMM and an artificial neural network. *Journal of Korean Society on Water Quality*, Korean Society on Water Quality, Vol. 27, No. 5, pp. 670-679.
- Lee, N.J., Park, J.H., Kim, Y.D., and Son, B.J. (2005) Fundamental study on improving water quality of the West-Nakdong River by the gates operation. *2005 KSCE Annual Conference*, Korean Society of Civil Engineers, pp. 299-302.
- Ministry of Construction & Transportation (2001) The Seonakdong-gang master plan. Busan Regional Construction and Management Administration.
- Nakdong River Basin Environmental Office (2008) Water environment management plan for medium influence areas of the Nakdonggang estuary.
- Rossman, L.A. (2009) *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.0*. EPA/600/R-05/040, National Risk Management Research Laboratory, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio.
- Seo, D.I. and Lee, J.W. (2005) Prediction of sediment transport characteristics due to dredging works using 3D hydrodynamic model, EFDC. *Proceedings of the 2005 Spring Co-Conference of the Korean Society on Water Environment and Korean Society of Water and Wastewater*, Korean Society of Water Quality, pp. 360-363.
- Shin, M.C., Oh, D.M., Lee, Y.S., and Lee, M.U. (2008) Prediction of water quality variation at dredging sediments using WASP5. *Proceedings of the 2008 Spring Conference of the Korean Society of Environmental Engineers*, Korean Society of Environmental Engineers, pp. 1012-1022.
- Wool, T.A., Ambrose, R.B., Nartin, J.L., and Comer, E.A. (2002) *Water Quality Analysis Simulation Program (WASP) Version 6.0 Draft: User's Manual*. USEPA-Region 4.

© Received April 5, 2013

© Revised April 8, 2013

© Accepted April 30, 2013