

남강의 수질예측을 위한 QUAL2E 모델 적용

崔亨燮 · 朴泰朱* · 許鍾秀**

Application of QUAL2E Model to Water Quality Prediction of the Nam river

Hyoung-Sub Choi, Tae-Ju Park*, and Jong-Soo Heo**

Abstract

This research was conducted to apply the QUAL2E model to be adopted to the Nam river under current water quality conditions. The survey area of total 60 Km was divided into five reaches. Each reach was then subdivided into the uniform computational elements of 1.5 Km. Based on the stream characteristics, nine sampling stations consisting of six at main streams and three at tributaries were selected. The field data were obtained from the selected stations twice during October of 1991 and May of 1992, which represented the cold weather and low flow, also the warm weather and low flow conditions, respectively. As the results of sensitivity analysis of the model, the important parameters were the rates of BOD decay, Org-N oxidation, NH₃-N oxidation, Org-P decay. The calibrated and verified results by QUAL2E model were correlation coefficient of 0.45~0.94.

The results displayed a good agreement between the variables of the field measurements and the model simulations, indicating a potential use of the QUAL2E model for the water quality assessment in the Nam River.

경상남도보건환경연구원(Provincial Government Institute of Health and Environment, Chang Won, 133-1, Kyong Sang Nam-Do)

* 부산대학교 공과대학(College of Engineering, Pusan National University, Pusan, 2-32, Korea)

** 경상대학교 농과대학(College of Agriculture, Gyeongsang National University, Chin Ju, 660-701, Korea)

서 론

하천 수질은 배수구역의 지질, 수문, 기상 등과 같은 자연조건과 산업화, 도시화 및 영농행위등으로 인한 인위적인 조건에 의하여 영향을 받는다. 하천 수계의 수질변화를 보다 합리적으로 예측하기 위하여, 강에 유입된 오염물의 시간적, 공간적인 분포를 재현하고, 현재 조건을 파악해서 오염물이 수계내에서 물리, 화학 및 생물학적으로 변화하는 정도를 예측 관리하는 수학적 모델이 널리 이용되고 있다. 이러한 수질모델은 하천이나 강의 수질관리 대안을 분석하는데 필요한 최소한의 정밀도만 있으면 되며, 고도로 정교하고 복잡한 모델은 모델에 필요한 자료를 수집, 분석하는 것이 어려울 뿐만 아니라 불필요한 경우가 많다. 그러므로 우선 모델링할 특정 체계에 있어서 중요한 수질인자와 수질에 영향을 미치는 조건을 효과적으로 시뮬레이션할 수 있는 가장 간단한 모델을 채택하는 것이 보다 바람직할 것이다.^{1,2)} 하천모델은 DO-BOD관계를 최초로 모델로 설명한 Streeter-Phelps²⁾식으로 부터 SNSIM, MIT, WQRRS, QUAL1, QUAL2, QUAL2E^{3,4)} 등에 이르기까지 제시되었지만 국내에서는 QUAL2E를 많이 사용했으며, 그 실효성이 인정되고 있다.^{5,6)}

하천 수질모델인 QUAL-1은 1977년 F.D.Masch and Associate 그리고 Texas Water Development Board에 의해 개발되었으며, 이듬해인 1978년에 QUAL-1을 수정, 확장시킨 QUAL-2가 미국 환경청(EPA)과 계약한 Water Resources Engineers Inc에 의해 개발되었다.^{7,8,9,10)} QUAL-2는 여러차례 확장 변형되어 QUAL-2/SEMCOG로 발전되었다. 다시 이 QUAL-2를 보완하고 개인용 컴퓨터에 사용할 수 있게 만든 것이 QUAL2E¹¹⁾이다.

남강은 진주시 남강댐 하류에서 낙동강까지 유역면적이 1617.4Km²이며, 남강의 수질은 1개시 3개군을 거쳐 흐르는 동안 생활하수, 공장폐수 및 농업배수 등으로 오염되어 수질환경기준으로 2등급 수준에 이르고 있으며, 앞으로 진주시를 중심으로 한 서부 경남지역의 개발은 남강하류의 오염을 더욱

가중시킬 것으로 예상된다. 또한 송⁵⁾의 연구에 의하면 각종 생활하수 및 농공용수로 이용하고 있는 낙동강에 남강의 오염부하량이 미치는 영향은 조사한 항목에 걸쳐 0.56~41.8%에 이른다고 하였다. 따라서 낙동강의 수질보전을 위해서도 남강의 수질관리가 절실히 요구되고 있는 실정이다.

따라서, 본 연구는 QUAL2E모델을 이용하여 남강의 각 수질항목에 대한 반응계수의 민감도를 조사하여 반응계수가 수질에 미치는 영향을 조사하고 모델의 보정과 검증을 거쳐, 장래 남강 수질변화를 예측함으로써 남강 수질관리를 위한 기초자료를 제공코자 하였다.

재료 및 방법

1. 조사대상지역

본 연구의 조사 대상 지점은 남강댐에서 낙동강 합류점까지 총 79 Km의 남강수질에 주로 영향을 미칠 것으로 고려되는 생활하수, 공장폐수 및 농업용수가 유입되는 9개지점, 즉 본류의 6개 지점(1~6)와 유입지천의 3개 지점(P1~P3)을 선정하였다. (Fig. 1)

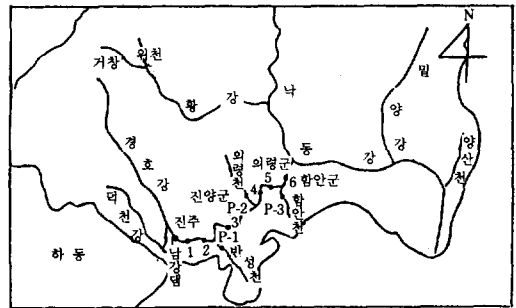


Fig. 1. Location of samplings.

2. QUAL2E모델의 입력인자

수질은 1991년 10월 16일, 1992년 5월 15일에 본류 및 지류에 대하여 조사 분석되었으며, 본류 최종 상류 유량은 조사 당일 남강댐 방유량으로 하였으

며, 각 지류의 유량은 유속계를 이용하여 측정된 유속에 하천 단면을 곱하여 총 유량을 구하였다. 또한 QUAL2E에서 필요한 각 변수들은 최³⁾, 송⁵⁾, 박¹⁴⁾ 등이 연구한 변수들을 참고하여 이 모델에서 제시한 변수값을 변화시켰다.

3. QUAL2E모델의 민감도 분석

수질모델에 있어서 모델을 구성하고 있는 각 수질인자 및 반응계수들이 모델에서 도출하고자 하는 수질인자의 변화에 미치는 영향을 평가할 필요가 있다. 따라서 민감도 분석은 수질오염을 야기시키는 인자와 수질변화에 중요한 역할을 하는 변수들을 파악케 함으로써, 여러가지 요인에 의한 모델의 각 구성인자의 변동에 따른 수질변화 정도를 예측할 수 있게 하여 하천 수질관리의 방안을 모색하는데 이용될 수 있다.¹⁵⁾ 그러므로 본 연구에서도 민감도 분석을 위하여 1991년 10월 16일 조사된 수질 자료에 본 모델에서 추천한 반응계수의 최소, 최대값 및 모델보정시에 사용된 값을 적용하여 변화된 농도범위와 평균 최고농도 차이를 기준으로한 백분율을 나타내어 반응계수들이 수질성분에 미치는 영향을 나타내었다.^{16,17)}

4. QUAL2E모델의 보정 및 검증

모델 보정은 실측된 수질값과 계산값과의 차이를 극소화 하는 과정으로 각종 반응계수들을 시행오차법으로 입력하여 실시된다.¹⁸⁾ 따라서, 모델보정은 하천의 유량이 비교적 안정된 1991년 10월 16일 자료를 이용하였다. 보정방법은 Fig. 2와 같이 구획을 5개로 구분하고 소구획을 1.5 Km 간격으로 총 40개로 세분하여 조사된 실측치와 시뮬레이션된 계산치가 일치할 때까지 구간별로 QUAL2E모델에서 제시된 각종 반응 계수를 수정하여 실시하였다. 또한 모델 검증은 보정에 사용된 계수값을 이용하여 1992년 5월 15일의 자료로 실시하였다. 조사구간내 수질분석은 Standard method¹⁹⁾와 일본 위생 시험법 주해²⁰⁾에 의한 방법으로 분석하였다.

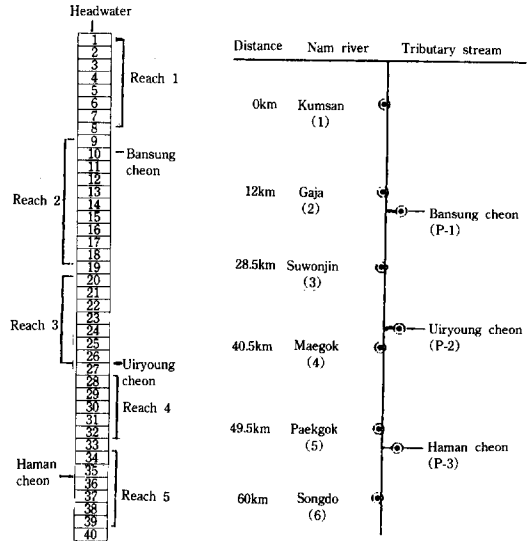


Fig. 2. Diagram of computational elements, reaches and sampling station

결과 및 고찰

1. 입력자료의 선정

현장수질 분석결과는 표 1과 같으며, 조사당일의 필요한 기상자료는 마산 지방 기상대에서 구하여 표 2에 나타냈다. 그리고 수리학적 자료는 “전국 주요 하천 기초조사” 보고서¹⁵⁾를 참고하였다.

2. 모델 변수의 민감도 분석

모델 민감도 분석은 모델변수의 변화가 결과치에 미치는 영향을 평가하는 것으로 송⁷⁾, 박¹⁴⁾, 안²¹⁾ 등이 낙동강에서 일부 반응계수에 대하여 실측한 자료가 있다. 그러나 남강에 대한 반응계수 자료는 없는 실정이며, 또한 실측 할 수 있는 여건의 한정성 때문에 Fig. 3에 나타난 변수들에 대하여 모델에서 제시한 변수값을 시행오차법으로 변화시켜가며 분석하였다.

이러한 민감도 분석 결과에 따르면, 용존산소(DO)에 가장 영향을 많이 미치는 변수는 BOD decay rate constant(K1)와 Benthic oxygen uptake

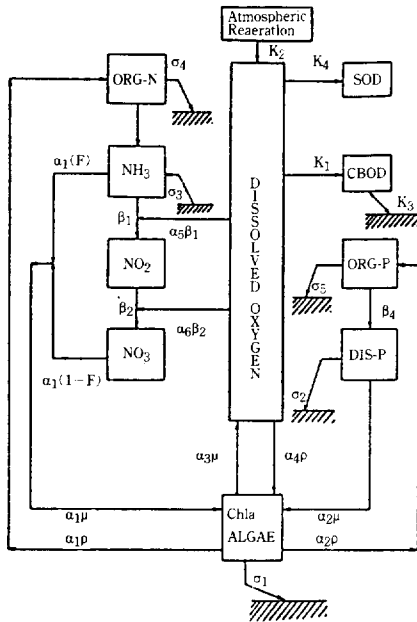


Fig. 3. Major constituent interactions in QUAL2E.¹¹⁾

(K_4)로 각각 0.41, 0.172 mg/l의 농도차이를 보였다. 그리고 유기성 질소와 암모니아성 질소 분해 계수도 각각 최고농도차를 포화백분율로 계산할 때 23.4, 16.1%의 영향을 주고 있는 것으로 나타났다.

BOD의 경우는 BOD decay rate constant(K_1)가 2.198 mg/l의 농도차로 큰 감응도를 나타냈다. 암모니아성 질소의 경우는 Org-N oxidation rate constant(β_3)가 0.42 mg/l의 농도차로 큰 감응도를 나타내었고 NH_3 oxidation rate constant(β_1)가 최고 농도차를 포화백분율로 계산할때 37.6%의 영향을 주는 것으로 나타났다. 그 외는 거의 영향을 주지 않았다. 아질산성 질소의 경우는 NH_3 oxidation rate constant(β_1), Org-N oxidation rate constant(β_3)가 각각 0.052, 0.046 mg/l로 큰 농도차를 보였으며, NO_2 oxydation rate constant(β_2)은 최고 농도차를 포화 백분율로 계산할 때 3.8%의 영향을 주었다. 질산성 질소의 경우는 NH_3 oxydation rate constant(β_1), Org-N oxydation rate constant(β_3)가 각각

Table 1. Analytical data for the water quality assessment for water samples collected from each station

Time	Flow (m ³ /s)	St.	Temp. (°C)	DO ()	BOD	Org-N	NH_4^+ -N	NO_2^- -N	NO_3^- -N	Org-P	PO_4^{3-} -P	Chla (mg/m ³)	
1991 October	29.2	1	18.0	6.01	3.06	1.94	0.35	0.044	0.76	0.106	0.020	7.60	
		2	18.5	7.92	2.62	1.83	0.29	0.049	0.73	0.103	0.015	8.10	
		3	19.0	8.85	2.12	1.69	0.19	0.035	0.76	0.079	0.022	8.20	
		4	20.0	9.56	2.07	1.54	0.10	0.030	0.79	0.077	0.032	8.00	
		5	19.0	9.87	2.16	1.56	0.08	0.032	0.77	0.077	0.030	8.30	
		6	19.0	9.80	2.20	1.56	0.07	0.030	0.77	0.075	0.030	8.90	
	0.66	P-1	17.0	7.20	2.0	0.90	0.026	0.011	0.46	0.08	0.002	5.60	
		1.74	P-2	18.0	8.30	1.5	1.58	0.097	0.029	0.71	0.09	0.004	8.90
		3.69	P-3	19.0	6.80	2.8	1.97	0.391	0.032	1.04	0.12	0.007	10.9
1992 May	33.3	1	19.0	7.10	3.56	1.71	0.30	0.050	0.41	0.060	0.003	6.60	
		2	19.5	7.40	3.46	1.65	0.28	0.042	0.41	0.054	0.005	8.30	
		3	20.0	7.74	3.28	1.56	0.11	0.021	0.43	0.056	0.008	12.6	
		4	20.5	8.40	3.16	1.46	0.10	0.023	0.44	0.039	0.012	13.5	
		5	20.5	9.00	3.06	1.13	0.11	0.023	0.44	0.037	0.010	15.9	
		6	20.0	8.40	2.90	0.98	0.08	0.018	0.40	0.039	0.010	16.4	
	1.20	P-1	19.0	7.90	3.70	1.36	0.091	0.033	0.46	0.03	0.005	5.64	
		2.35	P-2	18.0	9.10	1.40	1.90	0.171	0.021	0.56	0.03	0.006	4.64
		3.84	P-3	20.0	8.60	4.40	1.88	0.202	0.037	0.46	0.07	0.010	18.9

Table 2. Regional Climatic during the sampling time

Climatic Data	October '91	May '92
Cloudiness (Fraction in tenths of cloud cover)	0.8	0.6
Dry Bulb Temp.(°C)	14.0	15.0
Wet Bulb Temp.(°C)	12.0	14.0
Atmospheric Pressure(mb)	1015.9	1005.0
Wind Speed(m³/s)	1.2	1.4

0.104, 0.050 mg/l의 농도차로 큰 감응도를 나타냈다. 유기성질소의 경우 Org-N oxidation rate constant (β_3)가 0.508 mg/l로 큰 영향을 주었으며, 그 외는 최고 농도차를 포화 백분율로 계산할 때 5% 미만으로 나타났다.

무기성 인과 유기성 인의 경우 Org-P decay rate constant(β_4)가 큰 감응도를 보였다. 클로로필 a는 Maximum algal growth rate(μ_{max})가 4.244 mg/l의 농도차로 큰 민감도를 보였으며, Algal respiration rate(ρ)와 Org-P decay rate constant(β_4)도 최고 농도차를 포화백분율로 계산할 때 67.4, 36.9%의 감응도를 나타내었다. 따라서, 모델변수의 민감도 분석 결과는 BOD, DO의 경우 BOD decay rate constant, 영양염류인 경우 Org-N oxidation rate constant,

NH₃-N oxidation rate constant, Org-P decay rate constant가 각 수질인자에 중요한 변수로 작용하였다.

3. 모델변수의 보정

현장 실측치는 1991년 10월 16일 조사자료를 사용하여 입력변수는 모델에서 제시한 변수값 및 기타문헌^{6,22)}에서 조사된 계수값을 이용하였다. 실측치와 계산치의 상관성을 알아보기 위한 보정작업의 결과는 표 3에서 보여주고 있다. 하천용량과 수계에서 오염의 지표로서 중요한 DO의 변화는 K₁(BOD decay rate constant)와 대기의 재폭기에 의해 크게 좌우되므로, 제시된 반응계수를 변화시켜 보정한 결과 K₁은 0.15~0.30 day⁻¹의 범위를 유지하였으며, 농도계산 결과는 6.62~9.02 mg/l의 범위로 나타났다. 실측치인 6.01~9.80 mg/l과 비교한 상관계수는 r=0.93으로 좋은 상관성을 보였다. BOD의 경우는 K₁에 의해 큰 영향을 받고 있는데 계산치(2.96~1.87 mg/l)와 실측치(3.06~2.20 mg/l) 사이의 상관계수가 r=0.94로 잘 일치했다. Org-N과 무기성 질소 성분은 β_3 (Rate constant for the hydrolysis of organic N to ammonia)와 β_1 (Rate constant for the biological oxidation of NH₃ to NO₂)에 의해 크게 영향을 받는데 보정결과 β_3 와 β_1 의 범위는 각각 0.02~0.03, 0.15~0.35 day⁻¹로 모델에서 주어진 값의

Table 3. Model predicted variables and correlation coefficient between observed and model calibrated values for data of 1991 in each station.

Parameter	St	DO	BOD	Org-N	NH ₄ ⁺ -N	NO ₂ ⁻ -N	NO ₃ ⁻ -N	Org-P	PO ₄ ⁻³ -P	Chl.a
		(----- mg/l -----)								(mg/m ³)
Model Calibrated value	1	6.62	2.96	1.94	0.35	0.04	0.76	0.10	0.01	7.59
	2	8.70	2.62	1.92	0.33	0.05	0.79	0.09	0.02	7.71
	3	9.03	2.20	1.87	0.30	0.04	0.85	0.08	0.03	8.21
	4	9.06	1.96	1.83	0.29	0.03	0.87	0.07	0.04	8.79
	5	9.11	1.85	1.81	0.29	0.03	0.88	0.07	0.04	9.27
	6	9.02	1.87	1.82	0.29	0.03	0.91	0.07	0.04	9.89
Correlation coef.(r=)	92.7	93.5	98.3	97.2	93.0	61.1	95.2	85.7	94.1	

범위 내에 있었다. 그리고 실측치와 계산치와의 상관계수는 질산성 질소가 $r=0.61$ 이며, 그 외 질소성분은 $r=0.90$ 이상으로 나타났다. Org-P와 DIS-P은 β_4 (Rate constant for the decay of organic-P to dissolved-P)에 영향을 받는데 보정결과의 범위는 $0.20\sim 0.40 \text{ day}^{-1}$ 로 나타났다. 농도변화범위는 Org-P가 계산치 $0.07\sim 0.10 \text{ mg/l}$, 실측치 $0.075\sim 0.106 \text{ mg/l}$ 로 나타났으며 DIS-P은 계산치 $0.01\sim 0.04 \text{ mg/l}$, 실측치 $0.0015\sim 0.015 \text{ mg/l}$ 로 나타났다. 그리고 상관성은 각각 $r=0.95, 0.86$ 으로 나타나 양호한 편이었다. 클로로필 a에 영향을 주는 인자는 μ_{\max} (Maximum algal growth rate)와 ρ (Algal respiration rate) 그리고 β_4 인데 μ_{\max} 와 ρ 의 값은 $1.0, 0.1 \text{ day}^{-1}$ 으로 입력하였다. 농도변화 범위는 계산치 $7.56\sim 9.89 \text{ mg/l}$, 실측치 $7.60\sim 8.90 \text{ mg/l}$ 로 이며, 상관계수는 $r=0.94$ 를 나타내었다. 이러한 결과로 볼때 QUAL2E모델은 Org-N, Ammonia, Nitrate의 실측치와 계산치간에 다소 큰 농도차이를 보였으나, 전 항목의 상관성이 $0.61\sim 0.98$ 로 나타나 모델적용의 타당성이 있음을 알 수 있었다.

4. 모델의 검증

모델 적용의 타당성을 확인하기 위한 모델검증을 남강수계에 대한 1992년 5월 15일 자료를 이용하여 검증을 실시하였다. 검증작업 결과인 측정치와 시뮬

레이션한 계산치의 상관성은 표 4에 나타내었다.

DO와 BOD의 검증결과로서 모델보정시와 비교하여 DO의 경우는 상관계수값이 $r=0.68$ 로 낮은 값을 보였으나, BOD 검증결과는 상관계수 $r=0.93$ 으로 실측치와의 상관성이 좋았다. 유기성 질소와 암모니아성 질소의 경우는 남강상류 부분에서는 잘 일치하고 하류부분에서는 실측치와 계산치간의 오차가 상당히 크게 나타났으나, 상관계수가 $r=0.78, 0.97$ 로 실측치와 계산치간의 상관성은 좋게 나타났다. 또한 아질산성 질소와 질산성 질소의 검증결과는 상관계수값이 아질산성질소의 경우는 $r=0.89$, 질산성질소는 $r=0.45$ 로 나타났다. 유기성 인, 무기성 인

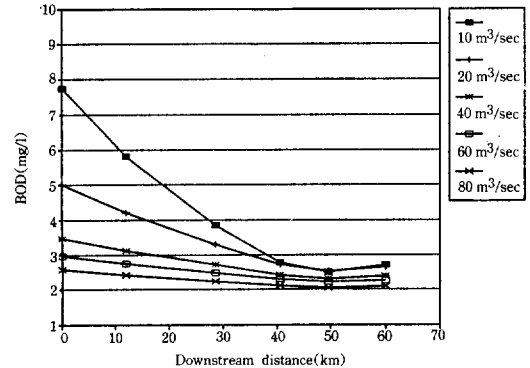


Fig. 4. Simulation Results for BOD changes due to the simulation of the headwater flow variation.

Table 4. Model verified and correlation coefficient between observed and model verified values for data of 1992 in each station.

Parameter	St	DO	BOD	Org-N	NH ₄ ⁺ -N	NO ₂ ⁻ -N	NO ₃ ⁻ -N	Org-P	PO ₄ ⁻³ -P	Chl.a
		(mg/l)								(mg/m ³)
Model Calibrated value	1	7.43	3.55	1.71	0.30	0.05	0.41	0.06	0.01	7.59
	2	8.48	3.15	1.69	0.28	0.05	0.45	0.05	0.01	7.65
	3	8.54	2.69	1.66	0.25	0.04	0.51	0.04	0.02	7.89
	4	8.57	2.36	1.65	0.24	0.03	0.54	0.04	0.02	8.01
	5	8.58	2.24	1.64	0.25	0.03	0.55	0.04	0.03	8.29
	6	8.57	2.34	1.65	0.24	0.03	0.55	0.04	0.03	8.57
Correlation coef.(r=)		67.5	92.8	77.9	97.4	88.9	45.1	73.5	78.8	94.2

Table 5. Present and predicted BOD loads in headwater of Nam River.^{(14), (15)}

Location	BOD loads		Flow
	Present	After wastewater treatment plant building	
Jinju city	4853 kg/d	2100 kg/d	70000 m ³ /d
Sangpyoung industrial complex	1185 kg/d	1185 kg/d	15401 m ³ /d

Average BOD concentration of Namgang Dam : 1.8 mg/l

그리고 Chl.a은 상관계수값이 r=0.73, 0.78, 0.94로 좋은 상관성을 보였다.

5. 유량 및 부하량에 따른 수질변화 예측

남강댐 방유량이 갈수기인 경우 10 m³/s 이하이며 평수량도 20~40 m³/s로서 남강댐의 방유량이 남강유량을 유지하는데 중요한 역할을 한다. 또한 본류 유량에 비해 지류의 유량이 매우 적다. 따라서 지류의 유량 및 수질을 일정하다고 가정하고 상류의 유량변화와 진주시 하수처리장의 건설에 의한 BOD 부하량변화로 인한 거리에 따른 BOD 농도변화를 예측하기 위하여 QUAL2E모델을 이용하여 모의실험(Simulation)을 실시하였다. 모의실험에 이용한 BOD 부하량의 변화는 표 5에 나타내었다. Fig. 4는 상류 유입 BOD 부하량을 6038 Kg/d로 고정시키고

남강댐의 방유량과 거리에 따른 BOD 농도변화를 예측한 것이며, Fig. 5는 진주시 하수처리장이 건설된 후에는 하수의 BOD 방류수 기준이 30 mg/l이므로 상류 BOD 부하량이 3285 Kg/d으로 추정되어 하수 처리장이 건설된 후 수질변화정도를 예측한 것이다.

이 결과 Fig. 4와 Fig. 5에 나타난 바와 같이 유량이 적은 경우 하류 40.5 Km까지는 BOD 농도변화가 심하였으나, 유량이 많은 경우는 농도변화가 거의 나타나지 않았다. 또한 하류 40.5 Km이하에서는 상류 유량의 증가에 대하여, Fig. 4의 경우는 농도가 2.78~2.09 mg/l, Fig. 5의 경우는 2.15~1.80 mg/l로 변화의 폭이 적었다. 그러나, 진주시 하수처리장 건설후에도 합안 가야읍에 1백 34만평의 합안 가야공단이 조성되어 창원, 마산의 배후 도시로 성장할 경우 남강 본류에 미치는 수질오염의 영향을 클 것으로 사료된다.

요 약

하천 수질관리 모델인 QUAL2E를 남강에 적용한 결과는 다음과 같다.

1. 모델변수의 민감도 분석 결과는 BOD, DO의 경우 BOD decay rate constant, 영양염류인 경우 Org-N oxidation rate constant, NH₃-N oxidation rate constant, Org-P decay rate constant가 각 수질인자에 중요한 변수로 작용하였다.

2. 모델보정 결과를 보면 실측치와 예측치의 상관성은 DO, BOD의 경우 r=0.93, 0.94로 높은 상

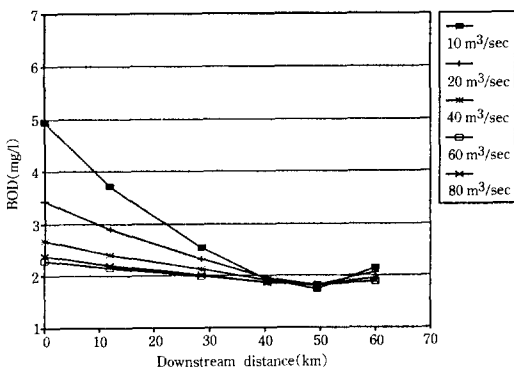


Fig. 5. Results for BOD changes due to the simulation of the headwater flow and load variation.

관성을 보였으며 영양염류인 경우는 질산성 질소가 $r=0.61$ 이었으나, 그 외는 $r=0.90$ 이상으로 나타났다.

3. 모델검증 결과는 보정시보다 상관성이 떨어졌으나 DO, $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 경우 $r=0.68, 0.45$ 로 낮고 그 외는 $r=0.75$ 이상으로 높은 편으로 나타났다.

4. 유량과 부하량의 변화에 대하여 하류 40.5 Km 이후의 BOD 농도변화는 적었으나, 하수종말처리장 건설이후 유량과 부하량을 변화시켜 수질농도를 예측한 결과 하류 40.5 Km 이후는 합안천의 영향을 받을 것으로 예측되었다.

참고문헌

- O'Connor D. J and J. A. Mueller (1981). Basic models of natural water system application to waste allocations:1.
- Mcbride G. B and J. C. Rutherford (1982). Handbook on estimating dissolved oxygen depletion in pollution rivers:1.
- 최영찬 (1991). 낙동강 하류의 부영양화 모델에 관한 연구, 부산수산대학교 박사학위 논문.
- 한국과학기술원 (1982). 대기, 수질 환경관리 전산모델연구.
- 송교욱 (1992). 낙동강 수계 수질관리를 위한 모델링, 부산수산대학교 박사학위논문.
- 한국건설기술연구원 (1987). PC용 하천 수질관리 모델의 개발.
- National Council for Air and Stream Improvement. (1982). A study of the election, calibration and verification of mathematical water quality models. New York, Technical Bulletin No. 391.
- Roesner, L. A, Giguere, P. R. and Evenson, D. E. (1981). Computer program documentation for stream quality model (QUAL-2). U.S. Environmental Protection Agency Athens, GA. EPA-600/9-81-014.
- JRB Associates. (1973). Users Manual for Vermont QUAL-2 Model, prepared for U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C.
- National Council for Air and Stream Improvement (1982). A review of the mathematical water quality model QUAL-2 and guidance for its U.S. New York, Technical Bulletin No. 391.
- Brown, L. C. and T. O. Barnwell (1985). Computer program documentation for the enhanced stream water quality model Qual2E. U.S. Environmental Protection Agency, Athens, GA, EPA/600/3-35/065.
- 부산환경지청 (1989). 부산, 경남 권역별 환경관리대책 : 78
- 환경처 (1991). 한국환경연감(제4호) : 81.
- 박혜영 (1992). 낙동강에서의 영양염 분포특성에 관한 연구, 부산수산대학교 석사학위논문.
- 국립환경연구원 (1983). 전국 주요하천 기초조사(II).
- 김중구 (1990). WQRRS Model을 이용한 회동수원지 수질예측에 관한 연구, 부산수산대학교 석사학위논문.
- 정창화 (1988). Qual2E모델을 이용한 낙동강 수계의 반응계수 민감도 분석과 수질예측, 영남대학교 석사학위논문.
- Park S. S and C. G. Uchrin (1990). Water Quality Modeling Study of the Matchaponic Brook; Application of QUAL2E : Korean Journal of limnology **23** : 85-98.
- APHA, AWWA, WPCF. Standard Method for the Examination of water and waste water, 16th ED.
- 일본 위생시험법 주해 (1990). 일본약학회편. 금원출판주식회사.
- 안옥성 (1992). 낙동강 수계의 용존산소 분포에 관한 모델링, 부산수산대학교 석사학위논문.
- 김동윤, 김창원, 박태주, 이상봉 (1990). 낙동강에 대한 QUAL2E의 적용, 부산대학교 환경문제연구소 환경연구보 제8권 : 9-15