

금강수계의 수질관리를 위한 QUAL-2E 모델의 적용(II) - 자생BOD를 고려한 허용오염부하량 산정-

김 종 구 · 이 지 연
군산대학교 해양환경공학과
(2000년 3월 30일 접수)

Application of QUAL-2E Model for Water Quality Management in the Keum River -Waste loads Allocation Analysis by Considering Autochthonous BOD-

Jong-Gu Kim and Ji-Yeun Lee

Dept of Marine Environmental Engineering, KunSan National University
(Manuscript received 30 March, 2000)

The Keum river has been utilized for drinking water supply of several city including Kunsan city and is deepening pollution state due to numerous municipal and industrial discharges.

The concentration BOD in river is affected by the organic loading from a tributary and the algae biomass that largely happen to under eutrophication state. In the eutrophic water mass such as the Keum river, the autochthonous BOD was very important part for making a decision of water quality management, because it was accounted for majority of the total BOD.

The predict of water quality has important meaning for management of water quality pollution of the Keum river.

The purpose of this study will manage and predict water quality of the Keum river using QUAL-2E model considering the autochthonous BOD.

The estimation of autochthonous BOD represented that the relationship between BOD and chlorophyll a. The regression equation was shown to be autochthonous BOD = $\beta_5 \times$ chlorophyll a. The results of this study may be summarized as followed;

The QUAL-2E model was calibrated with the data surveyed in the field of the study area in June, 1998. The calculated value by QUAL-2E model are in good agree to measured value within relative error of 7.80~20.33%. Especially, in the case of the considering autochthonous BOD, the calculated value of BOD were fairly good coincided with the observed values within relative error of 15%. But the case of not considering autochthonous BOD, relative error of BOD was shown to be 43.2%.

In order to attain II grade of water quality standard in Puyo station which has a intake facility of water supply, we reduced to the pollutants loading of tributaries. In the case of removed 100% BOD of tributaries, the BOD of Puyo station was 4.07mg/ℓ, belong to III grade of water quality standard. But in the case of removed 88% nutrient of tributaries, it was satisfied to II grade of water quality standard as below 3mg/ℓ of BOD.

For estimation of autochthonous BOD in Keum river, we are performed simulating in accordance with reduction of nutrient load(50~100%) under conditions removal 90% organic load. Occupancy of autochthonous BOD according to nutrient loading reductions were varied from 25.97~79.51%. Occupancy of autochthonous BOD was shown to be a tendency to increasing in accordance with reduction of nutrient loading.

Showing the above results, the nutrient that one of the growing factor of algae was important role in decision of BOD in the Keum river. For the water quality management of the Keum river, therefore, it is necessary to considering autochthonous BOD and to construction of advanced sewage treatment plant for nutrient removal.

Key words : The Keum river, Autochthonous BOD, Water quality management, Qual2E model

1. 서론

금강은 전라북도 장수군 장수읍 신무산에서 발원하여 충청남북도를 가로질러 서해안으로 유입되는 강으로 한강과 낙동강에 이어 우리나라에서 3번째로 큰 강이다. 유역면적은 남한의 10분의 1에 해당하는 9,866km²으로 총유로 연장은 401km에 이른다. 금강상류에 위치한 대청호는 유역면적 4,134km², 저수용량 14억 9천만 m³에 달하는 인공호수로 대전은 물론 충청남북도, 전라북도 지역에 상수 및 공업용수, 농업용수를 공급할 뿐만 아니라 관광 등에 이용되는 중요한 수자원이다.

금강으로 유입되는 지천은 50여개에 이르고 있으며 금강에 설치된 기초환경시설은 하수종말처리장과 분뇨처리장을 비롯하여 75개가 설치 운영 중에 있다. 대청댐 이하의 금강 하류부는 경사가 낮아 유속이 지체되면서 수질이 저하되고 있으며 중하류에 위치한 중소도시에서 배출되는 하수 및 폐수에 의한 오염 등으로 부여광역상수도 취수장의 수질이 97년 하계의 경우 BOD 3.3mg/ℓ로 3급수¹⁾로 나타나 금강수질개선을 위한 수질관리방안이 절실히 요구되고 있는 실정이다.

기존의 연구에서 하천의 효과적인 수질관리를 위하여 수질예측모델이 많이 사용되어져 왔고, 특히 QUAL-2E 모델²⁾, 낙동강^{3,4,5)}, 금강^{6,7,8)} 등 우리나라 주요하천에 적용되어 그 타당성이 입증되었으며, 이 밖에도 영산강⁹⁾이나 금호강¹⁰⁾ 외에 천안천¹¹⁾, 충주호¹²⁾, 만경강¹³⁾ 등 중소하천에서도 많이 적용되었다.

실제 하천의 수질관리를 위해 일반적으로 이용하는 수질인자인 BOD는 크게 외부오염원으로부터 기인되는 유기물과 자생유기물에 의한 것으로 구분이 되며 BOD 측정시 나타나는 값은 이 두 유기물을 모두 포함한 값이다. 그러나 기존의 QUAL-2E 모델에서는 하천의 영양염류에 의해 자생된 조류에 의해 발생된 자생 BOD는 고려되지 않았기 때문에 정확한 BOD를 예측할 수 없다는 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제점은 자생 BOD를 고려한 연구인 식물플랑크톤의 생산이 BOD에 미치는 영향¹⁴⁾, 낙동강에서의 자생 BOD를 고려한 연구^{5,15)}에서 이미 제시된 바가 있다.

따라서, 본 연구는 수질이 악화되는 하계의 금강 중·하류역의 수질관리를 목적으로, 먼저 HEC-2모델을 이용하여 하천의 수리수문 특성을 조사하고, 하천 수질예측에 많이 적용된 QUAL-2E 모델에 자생BOD를 수식화하여 모델내 포함시킨 후, 금강 하류부에 위치한 부여 상수원수 취수장을 중심으로 상수원수 2급수의 수질을 유지하기 위한 최적의 수질관리 방안을 제시하고자 한다.

2. 연구내용 및 방법

2.1. 수리모델의 구성

QUAL-2E 모델¹⁶⁾은 유속 및 수심 계산에 있어 하천 단면을 사다리꼴 모양으로 입력하거나 또는 수리학적 특성 즉, 유속-유량 및 수심-유량의 유량상수를 입력시킬 수 있다. 이 두 방법 중 유량상수의 입력이 보다 정확한 유속과 수심을 얻을 수 있으므로 수리모델링 결과 얻어진 일정 유량에 대한 유속과 수심자료는 수질모델링에

매우 유용하게 이용될 수 있다. 또 QUAL-2E 모델의 장점은 수리모델과 결합하여 사용할 수 있기 때문에 QUAL-2E 모델을 사용하기 전에 HEC-2 모델^{17,18)}의 결과를 이용하여 동일한 수리학적 특성을 가진 구간을 미리 구분함으로써 수질 모델 초기 입력변수를 추정하기 용이하다.

1) 모델 구역 설정

HEC-2모델의 출력자료로부터 대청댐에서 금강하구둑까지 129.5km의 거리를 수리특성이 유사한 8개의 구간으로 분리하고, 대청댐을 기점으로 Reach No.1은 129.5~125.03km, Reach No.2는 125.03~110.40km, Reach No.3은 110.40~90.25km, Reach No.4는 90.25~70.25km, Reach No.5는 70.25~54.86km, Reach No.6은 54.86~34.66km, Reach No.7은 34.66~14.66km, Reach No.8은 14.66~0km의 길이를 가진 8개의 구간으로 설정하였고, 각 reach는 1km 구간을 갖는 element로 구성하였다 (Fig. 1). 따라서 모델에서의 하천구성은 element 130개, Reach 8개로 구성하였다.

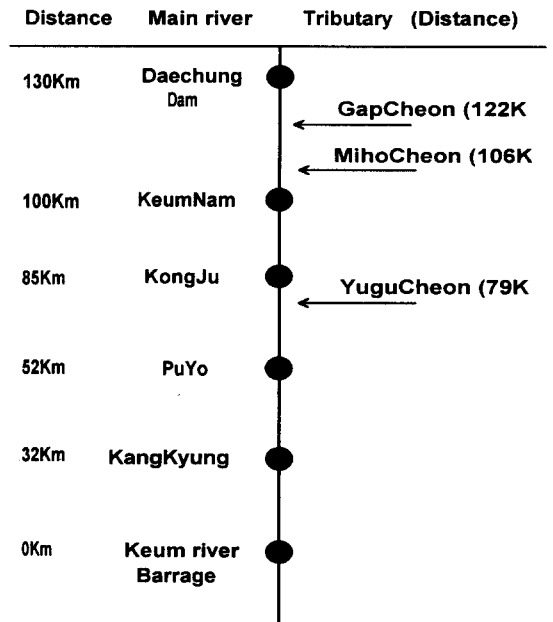


Fig. 1. Schematic diagram of study area.

2.2. 수질자료 및 주요 반응계수

금강하구둑을 기점으로 상류 130km 지점에 위치한 대청댐까지의 분류구간과 금강에 가장 큰 영향을 주는 대표적인 3개 지천인 갑천, 미호천 그리고 유구천의 수질 자료는 전보에서 제시된 자료를 이용하였다.

모델링 수행시 필요한 반응계수중 조류성장과 관계있는 조류성장속도, 반포화상수 및 조류의 BOD 전환계수는 전보에서 제시된 자료를 이용하였으며, 기타 반응계수는 문헌에서 제시된 계수범위내의 값을 이용하였다. 수온 및 생화학적 인자의 온도보정을 위한 기상자료는 1998년 6월의 기상월보¹⁹⁾를 이용하였다.

2.3. 자생 BOD 수식화

식물플랑크톤에 의한 자생BOD의 영향을 고려하기 위해 다음과 같은 식을 이용하여 자생 BOD를 평가하였다.

$$\text{Total BOD} = \text{Allochthonous BOD} + \text{Autochthonous BOD}$$

$$\text{Autochthonous BOD} = \beta_5 \cdot \text{Chl.a}$$

여기서, BOD : mg/ℓ

Chl.a : μg/ℓ

β₅ : converting factor (Autochthonous BOD/Chl.a)

본 연구에 사용된 전환계수는 전보에서 제시된 값의 범위내에서 사용하였다.

2.4. Qual2E 모델의 보정(Calibration)

하천에서 수질이 가장 악화되는 시기는 생물의 활동성이 증가되고 수량이 가장 적은 갈수기에 나타난다. 이때는 양호한 수질을 가진 상류수의 부족으로 각 지천으로 유입되는 오염물질을 충분히 희석시키지 못해 수질에 문제가 일어난다.

따라서 수질이 악화되는 갈수기인 하계 6월을 대상으로 이때의 자료를 이용하여 보정을 실시하였다. 모델 시작지점인 대청댐의 유량과 수질 및 주요 3개 지천의 유량과 수질을 하나의 경계조건 값으로 입력하여 모델의 실측치와 계산치가 일치할 때까지 구간별 각종 반응계수를 수정하면서 시뮬레이션을 실시하였다. 모델 반응계수의 적용은 최³⁾가 제시한 민감도분석(sensitivity analysis) 결과를 바탕으로 민감도가 큰 반응계수부터 조정하여 보정하였다.

모델의 보정은 실측치를 참값으로 모델 계산치와의 상대오차 및 상관관계로 표현하였으며, 모델의 주요변수인 용존산소(DO), 총무기질소(TIN), 용존인(DIP), Chlorophyll a, 및 BOD를 비교 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 수리모델

1) 수리·수문 인자

수리·수문 특성을 식(3-1)과 식(3-2)을 이용하여 계산되었으며, 이때 이용되는 계수값은 HEC-2모델의 출력 자료를 이용하여 계산하였다.

$$U = a Q^b \tag{3-1}$$

$$d = \alpha Q^\beta \tag{3-2}$$

여기서, Q는 유량(m³/sec), U는 평균유속(m/sec), d는 평균수심(m)을 나타내며, a, b는 속도에 대한 계수와 지수를, α, β는 수심에 대한 계수와 지수를 나타낸다. 수리, 수문 계산에 이용될 계수값을 Table 1에 나타내었다.

Headwater의 유량과 유입지천으로부터의 유량은 금강홍수통제소의 수위관측자료²⁰⁾와 건설교통부의 유량연보²¹⁾ 이용하였으며 대청댐 방류량과 부여취수장의 취수량은 수자원공사가 측정된 유량을 사용하였다. 입력된 유량자료는 1998년의 6월의 평균자료를 사용하였으며 그 결과는 Table 2와 같다.

Table 1. Hydrological parameters in the Keum river

Reach No.	a	b	α	β
1	0.0351	0.5576	0.2061	0.3798
2	0.0015	0.8011	2.5065	0.1165
3	0.0003	0.8843	5.5025	0.1018
4	0.0026	0.7360	1.2024	0.1978
5	0.0026	0.7360	1.2024	0.1978
6	0.0249	0.4380	0.4351	0.3321
7	0.0020	0.6677	1.1330	0.2194
8	0.0020	0.6677	1.1330	0.2194

Table 2. Flowrate of Headwater and Inflow in the Keum river

station		flowrate(m ³ /s)
Headwater	Daechung	67.25
Inflow	Gap cheon	21.62
	Miho cheon	52.95
	Yougu cheon	12.73
Outflow	Puyo intake	3.04

HEC-2의 입력표고는 건설교통부의 금강수계종합정비계획²²⁾의 평면도에 나타나있는 표고를 이용하였으며, 조도계수도 금강수계종합정비계획을 이용하였다.

3.2. QUAL-2E 모델의 보정(calibration)

선정된 입력자료를 이용하여 1998년 하계 수질을 simulation한 결과 중 BOD, TIN, DIP, Chl.a의 각 지점에서 실측치와의 관계를 Fig. 2에 나타내었고, 모델 재현 농도와 관측농도간의 상대오차와 상관관계를 Table 3에 나타내었다.

계산치와 실측치의 일치성을 평가하는 상대오차를 보면, 용존산소는 0.49~14.23%, 총무기질소는 0.18~28.44%, 인산인은 12.97~32.56%, Chl.a는 3.31~33.18%로써 비교적 실측치를 잘 재현하는 것으로 나타났다. 하천수질을 평가하는 가장 중요한 변수인 BOD의 상대오차를 보면, 자생 BOD를 고려하지 않았을 경우 0.00~66.82%로 큰 오차를 나타낸 반면에 자생 BOD를 고려한 경우 3.46~35.97%로 나타나 자생BOD가 BOD 농도결정에 중요한 역할을 하고 있음을 알 수 있다. 특히 하류역인 강경지점의 경우 자생 BOD를 고려하지 않았을 경우 상대오차가 가장 크게 나타났고, 반면에 자생 BOD를 고려하였을 경우 강경지점에서 가장 작은 상대오차를 보여 자생 BOD의 영향이 가장 큰 지점으로 나타났다. 하천 특성상 대청댐 하류측인 대전시와 청주시, 신탄진, 공주 등의 도시에서 유출된 생활하수가 하류로 유하하면서 조류발생에 필수원소인 영양염류를 제공하고 조류의 대량 번식을 야기 시킨다는 점에서 부영양화가 심해진 금강에

서는 자생 BOD의 고려가 필수적이라 할 수 있다.

모델 계산치와 실측치간의 유사성을 평가하는 상관계수를 보면, 0.64~0.96으로 나타나 비교적 양호한 상관성을 나타내고 있었다. 특히 BOD의 상관성에서 자생BOD를 고려하지 않을 경우 상관계수가 0.81이었으나, 자생 BOD를 고려한 후 0.96으로 거의 유사한 경향을 나타냄을 알 수 있었다.

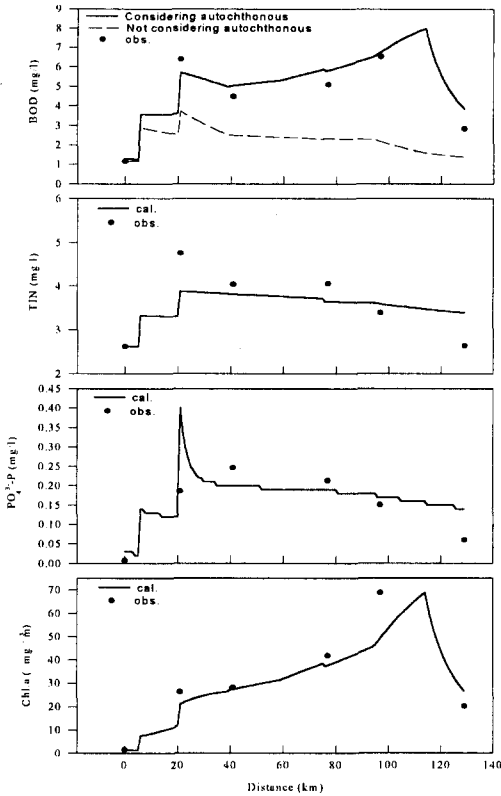


Fig. 2. Model calibration results(BOD, TIN, DIP, Chl.a).

Table 3. Relative error of the simulated and observed value for calibration in the Keum river

Station	Relative error for variable, %					
	DO	TIN	DIP	Chl.a	BOD*	BOD**
Daechung	6.14	0.18	29.08	3.31	0.00	12.59
Keumnam	14.23	18.38	12.97	24.55	41.72	10.75
Kongju	7.73	5.61	18.73	9.02	44.30	12.82
Puyo	0.49	10.34	15.61	16.01	54.31	14.39
Kangkyung	8.19	5.88	13.03	33.18	66.82	3.46
Kunsan	10.03	28.44	32.56	23.78	51.94	35.97
C.F.	0.66	0.81	0.64	0.95	0.81	0.96
Average	7.35	8.07	17.88	14.34	41.43	10.80

C.F. Correlation Factor

BOD* Result not considering the autochthonous BOD

BOD** Result considering the autochthonous BOD

3.3. 오염부하에 따른 수질예측

하천의 유기오염지표인 BOD를 이용하여 금강수계의 수질을 예측하였다. 금강수계에 가장 큰 오염영향을 미치는 두 지천인 미호천과 갑천의 BOD유입 부하량 조절에 따른 본류에서의 변화와 지천의 영양염인 질소와 인의 유입 부하량에 따른 본류에서의 변화를 살펴보았으며, 예측지점은 부여광역상수도 취수장 지점으로 하였다. 이에 대한 결과는 Fig. 3~4에 나타내었다.

1) 유기물부하 감소에 따른 수질예측

부여 광역상수도 취수장 지점의 현재의 BOD가 5.91mg/ℓ로 하천수질기준과 비교했을 때 3급수로 나타났다. 지천으로부터 유입되는 영양염의 감소 없이 유기물량의 감소에 따라 BOD의 변화를 예측하였다. 미호천과 갑천에서 유입되는 BOD를 50%, 70%, 90%, 100%로 감소시켰을 경우 부여광역상수도 취수장 지점의 BOD는 4.99mg/ℓ, 4.62mg/ℓ, 4.25mg/ℓ, 4.07mg/ℓ로 나타나 이것으로 지천에서의 BOD 유입량의 감소만으로는 하천수질기준 2급수의 한계수치인 3mg/ℓ가 불가능한 것으로 나타났으며 반드시 영양염류의 감소가 있어야 하는 것으로 나타났다.

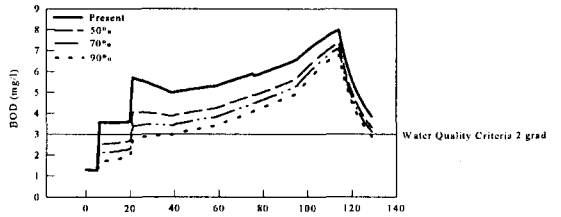


Fig. 3. BOD profile of the Keum river depending on various BOD loads in tributaries, under present condition.

2) 영양염 부하 감소에 따른 수질예측

지천의 유입 영양염류 농도감소에 따른 본류에서의 BOD변화 오염원으로부터 유입된 영양염을 이용한 식물플랑크톤은 자생BOD를 발생시킨다. 따라서 유기물의 변화가 없는 상태에서 지천으로부터 유입되는 영양염을 감소시켜 조류의 성장을 제어하여 금강본류수질을 개선하고자 하였다. 지천의 영양염을 50%, 70%, 90%, 100% 감소시켰을 경우에 부여광역상수도 취수장 지역의 BOD는 4.81mg/ℓ, 3.92mg/ℓ, 2.86mg/ℓ, 2.53mg/ℓ로 나타났으며, 88% 감소시키면 3mg/ℓ로 2급수로 되는 것으로 나타났다.

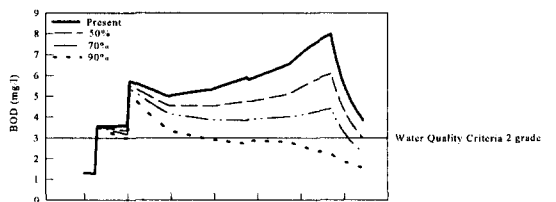


Fig. 4. BOD profile of the Keum river depending on various N, P loads in tributaries, under the present condition.

3) 자생 BOD의 평가

금강에서 자생 BOD에 의한 영향을 평가하기 위해서 기존하수처리장에서 사용하는 활성오니법에 의한 BOD의 평균제거율을 90%라고 가정하여 유입지천의 BOD를 90% 제거시킨 상태에서 영양염을 단계별로 제거시켰을 때 부여 광역상수도 취수장 지점에서 BOD 농도에 미치는 영향을 평가해 보았다. 유입BOD를 90% 제거시킨 상태에서 영양염을 50% 제거하면 BOD 농도가 3.14mg/ℓ, 70% 제거하면 2.26mg/ℓ, 90% 제거하면 1.19mg/ℓ, 100% 제거에서는 0.87mg/ℓ로 나타났고, 이 때 자생 BOD가 차지하는 비율은 각각 25.97%, 46.83%, 71.87%, 79.51%로 증가하는 것으로 나타났다. 이로서 금강수역의 수질관리를 위해서는 자생 BOD의 고려가 반드시 필요하며 영양염을 제거할 수 있는 고차처리시설이 반드시 필요한 것으로 나타났다.

이는 신⁵⁾이 낙동강을 대상으로 조사한 결과인 지점별 총BOD에 대한 자생BOD의 비율 31.7~52.5%와 계절별 총BOD에 대한 자생BOD의 비율 36.2~56.9%과는 비슷하였다.

본 연구에서는 유입BOD를 90%제거한 상태에서 영양염 제거효과에 의한 자생BOD의 비율을 평가하였기 때문에 실제 하천에서의 비율은 이 보다 낮은 비율을 가질 것으로 판단되나, 신⁵⁾의 결과는 실제하천에서 총BOD에 대한 자생BOD의 비율을 평가한 것으로 다소 차이가 있다.

4. 결 론

본 연구는 금강 본류의 효율적인 수질관리를 위하여 수질이 악화되는 하계의 금강 중·하류역을 대상으로 하여, 우리나라의 하천 수질관리에 많이 적용되어 그 타당성이 검토된 QUAL-2E 모델에 자생BOD를 포함시켜, 상수원수 2급수의 수질을 유지하기 위한 최적의 수질관리 방안에 대한 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

모델에서의 자생BOD의 평가는 BOD와 Chlorophyll a의 상관관계식인 $BOD = \beta_5 \times \text{chlorophyll a}$ 로서 표현하였다.

모델의 보정 결과 모델재현농도와 실측농도와의 상대오차가 7.80~20.33%의 범위로 모델이 수질을 잘 재현하는 것으로 나타났다. 특히, BOD의 경우 자생 BOD를 고려하지 않았을 경우 상대오차가 43.2%로 매우 큰 상대오차를 나타낸 데 비해 자생 BOD를 고려한 모델의 BOD재현결과는 15.0%의 상대오차를 보여 자생BOD의 고려가 필요함을 평가할 수 있다

상수취수원이 있는 부여지점에서의 상수원수 2급수 유지를 위한 수질관리 대안을 조사한 결과, 지천으로부터 유입되는 BOD 부하량만을 감소시킬 경우 100%가 감소되더라도 금강의 수질은 BOD 4.07mg/ℓ로 3급수에 해당하였으며, 영양염만을 88%감소시키면 하천수질기준 2급수의 한계수치인 3.0mg/ℓ에 나타나 이로서 영양염의 유입량을 감소시키는 것이 더 효율적인 것으로 나타났다.

자생BOD의 평가를 위하여 유입BOD를 90%제거한 상태에서 영양염을 단계적으로 50%, 70%, 90%, 100%를 제거한 결과 자생BOD의 비율이 각각 25.97%, 46.83%,

71.87%, 79.51%로 증가하는 것으로 나타났다.

따라서 조류성장원인 영양염은 하천의 BOD 농도결절에 중요한 역할을 하며, 금강의 수질관리를 위해서는 자생 BOD의 고려가 반드시 필요하며 영양염을 제거할 수 있는 영양염 제거시설이 필요한 것으로 나타났다.

사 사

본 논문은 군산대학교 수산과학연구소 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) 금강환경관리공단, 1998, 금강수계오염도 현황.
- 2) 안태홍, 1998, QUAL-2E 모형을 이용한 한강 본류수질의 예측, 서울대학교, 석사학위논문.
- 3) 최영찬, 1991, 낙동강 하류의 부영양화 모델링에 관한 연구, 부산수산대학교 박사학위논문.
- 4) 송교욱, 1992, 낙동강 수계의 수질관리를 위한 모델링, 부산수산대학교 박사학위논문.
- 5) 신성교, 1996, 자생 BOD를 고려한 낙동상의 수질관리, 부경대학교 석사학위논문.
- 6) 김선미, 1994, QUAL 2E 모델을 이용한 금강 하류의 수질변화에 관한 연구, 충남대학교, 석사학위논문.
- 7) 최홍식, 이길성, 1987, QUAL 2 모형의 금강수계에의 적용, 대한 상수도학회지, 제1권 제2호.
- 8) 수도운영처, 1993, 댐 방류량이 하천 수질에 미치는 영향에 관한 연구, 한국수자원 공사.
- 9) 김기열, 1992, QUAL 2E 모델을 이용한 영산강의 수질예측, 중앙대학교 석사학위논문.
- 10) 손동훈, 1995, QUAL 2E 모델을 이용한 금호강 수질예측, 경북대학교 석사학위논문 .
- 11) 이경주, 1994, QUAL-2E 모형을 이용한 천안천 수질에 대한 연구, 대전산업대학원 석사학위논문.
- 12) 김종상, 1989, 충주호 유입천에 대한 QUAL-2E 모형의 적용, 서울대학교 석사학위논문.
- 13) 심재환, 최문술, 1991, QUAL-2E 모델에 의한 만경강의 수질예측, 한국환경농학회지, 제10권 제1호.
- 14) 이수용, 1995, 낙동강에서의 Chlorophyll a 와 BOD와의 상관관계, 부경대학교 석사학위논문.
- 15) 백경훈, 1998, 낙동강유역의 수질오염 부하량산정, 부경대학교 석사학위논문.
- 16) Environment research laboratory, 1987, The enhanced stream water quality models 'QUAL2E and QUAL2E UNCAS', EPA.
- 17) Hydrologic Engineering Center, 1990, Hydrologic engineering center HEC-2 water surface profiles, US Army Corps of Engineers.
- 18) 건설기술정보센터, 1995, HEC 2 수면곡선계산프로그램, 한국건설기술연구원.
- 19) 기상월보, 1998.6. 기상청.
- 20) 금강홍수통제소, 1998, 금강수위자료.
- 21) 유량연보, 1997, 건설교통부.
- 22) 금강수계종합정비계획, 1988. 건설부.