

금강수계의 수질관리를 위한 QUAL2E 모델의 적용(Ⅰ) - 모델입력인자 산정 및 자생BOD 평가 -

김종구·이지연
군산대학교 해양환경공학과
(2000년 3월 30일 접수)

Application of QUAL2E Model for Water Quality Management in the Keum River(Ⅰ) - Estimation of Model Input Parameter and Autochthonous BOD -

Jong-Gu Kim and Ji-Yeun Lee
Dep't of Marine Environmental Engineering, KunSan National University
(Manuscript received 30 March 2000)

The Keum river is one of the important river in Korea and has a drainage area of 9,873 km². The Keum river is deepening pollution state due to development of the lower city and construction of a industrial complex. The water quality of the Keum river come to eutrophication state and belong to III grade of water quality standard.

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 purpose of this study was to survey the characteristics of water quality in summer and to estimate reaction coefficient. Also, we studied to correlationship between chlorophyll a and BOD(COD) for estimation of the autochthonous BOD. The correlationship between chlorophyll a and BOD(COD) were obtained through the culture experiment of phytoplankton in the laboratory. The results of this study may be summarized as follows :

The characteristics of water quality in summer were belong to III~IV grade of water quality standard as BOD and nutritive condition is very high.

The BOD, ammonia nitrogen and phosphate loadings in Miho stream which inflowing untreated sewage from Chungju city was occupied with 64.07%, 26.36%, 46.08%, respectively.

Maximum nutrient uptake (V_{max}) was 0.4400 $\mu\text{M/hr}$ as substrate of ammonia nitrogen, 0.1652 $\mu\text{M/hr}$ as substrate of phosphate. Maximum specific growth rate (μ_{max}) was 1.2525 hr^{-1} as substrate of ammonia nitrogen, 1.5177 hr^{-1} as substrate of phosphate.

The correlation coefficient between chlorophyll a and BOD by the culture experiment were found to be 0.911~0.935 and 0.942~0.947 in the case adding nutrient and no adding nutrient, respectively.

The correlation coefficient between chlorophyll a and COD through the culture experiment were found to be 0.918~0.977 and 0.880~0.931 in the case adding nutrient and no adding nutrient, respectively.

The autochthonous BOD(COD) was estimated to the relationship between BOD(COD) and chlorophyll a. The regression equation were found to be autochthonous BOD=(0.045~0.073) \times chlorophyll a and autochthonous COD=(0.137~0.182) \times chlorophyll a.

Key words : Keum river, Water quality management, QUAL2E, Autochthonous BOD, Maximum nutrient uptake, Maximum specific growth rate, Culture experiment

1. 서론

금강은 전라북도 장수군 장수읍 용연리 신무산에서

발원하여 대청댐을 거쳐 대전, 공주, 부여 등의 중소도시를 통과하여, 군산과 장항 사이에 위치한 하구를 통하여

서해안으로 흐르는 유로 연장 412km, 유역면적 9,886km²에 이르는 남한 제3의 하천이다¹⁾.

금강은 타 하천에 비하여 오염원이 적은 수계로써 수량과 수질면에서 안정적인 편이었으나, 최근 중부권의 급속한 발전에 따른 용수수요의 증가 및 오염부하량의 증가로 인하여 수량확보 및 수질관리에 있어 문제가 대두되고 있다. 특히 금강 상류의 용담댐의 건설 및 금강 하구언의 수문가동에 따라 금강의 수량과 수질에 큰 변화가 일어나고 있다²⁾.

지형적으로 대청댐 이하의 금강 중·하류부는 경사가 낮아 유속이 지체되면서 수질이 저하되고, 금강 주변의 공단에서 배출되는 하·폐수 및 중소도시의 생활하수에 의한 영향을 직접 받고 있다. 이로 인한 금강수계의 영양단계가 부영양화 단계로 진행되고 있어 종합적인 수질관리 대책수립이 시급한 실정이다.

하천의 수질관리를 위해 일반적으로 이용하는 수질인자인 생물학적산소요구량(BOD)은 외부오염원으로부터 기인되는 외래성유기물과 내부의 영양염을 이용하여 성장하는 조류에 의해 기인되는 자생유기물(자생BOD)로 나타낼 수 있다. 하천관리를 위하여 BOD의 부하를 감소시키기 위한 대안으로 이용되는 2차처리의 하수 및 폐수 처리장 건설로는 하천 자체에서 유발되는 자생유기물을 처리할 수 없어 적절한 하천 수질관리가 되지 못하고 있는 실정이다.

일반적으로 BOD는 “미생물이 호기적 조건하에서 5일간 유기물을 분해하는데 소모되는 산소의 양”이며, 이는 미생물에 의해 분해가능한 유기물의 양을 나타내는 지표가 된다. 부영양화된 수계에서 측정된 BOD 농도에는 식물플랑크톤의 호흡에 의한 용존산소 소모량과 식물플랑크톤 사체의 미생물 분해에 의한 용존산소 소모량이 포함된다.

부영양화된 하천에서의 자생BOD의 비율은 각 부하점에서 오염물질 배출상황과 유역특성에 따라 다양한 분포를 나타내는데, 하천수계의 BOD 농도관리를 위해서는 하수발생량 증대에 따른 미처리된 유기물오염부하에 의한 유입BOD와 미처리된 질소와 인의 유입에 따른 식물플랑크톤 생산에 의한 자생BOD를 정량적으로 평가할 필요가 있다.

수계 총 유기물 농도 중 자생유기물이 차지하는 비율을 밝히기 위한 많은 연구가 이루어졌다. Vera 등³⁾은 호소에서 유입수와 유출수의 물질수지식을 이용하여 자생BOD를 평가하였고, Fallon 등⁴⁾은 ¹⁴C를 이용해서 bloom을 이룬 남조류가 BOD₂₀ 값의 80% 정도를 차지한다고 보고하였다. Nakanishi⁵⁾는 부영양화된 해역을 대상으로 자생COD를 평가하기 위하여 Chl.a와 COD의 일차상관식을 바탕으로 자생COD를 평가하였다. 국내에서는 낙동강에서 식물플랑크톤의 생산이 BOD에 미치는 영향⁶⁾과 낙동강에서의 자생 BOD를 고려한 수질관리 연구^{7),8)}가 있다.

또한 하천수질은 수계내에서 오염물질의 물리, 화학, 생물학적 작용의 결과로 나타나며, 이를 상호작용을 수식화하여 개발된 수질모델을 이용하여 수질개선 및 관리

에 이용한다. 국내 하천에 많이 적용된 Qual2E 모델은 대표적인 하천모델이나, 자생BOD에 의한 관련된 식이 없어 정확한 수질을 재현하는데 문제점이 있어 자생BOD를 고려한 모델의 수정이 필요하다.

기존의 금강 수질에 관한 연구를 보면, 금강 하구둑 건설전인 1986년에 금강 하류역에서 수질의 시공간적 변화특성은 주로 조석의 영향을 크게 받고 있다고 보고⁹⁾하였으며, 금강하구둑 건설 전·후의 해양환경변화에 관한 연구에서 하구내, 외의 수질에 큰 변화가 나타났다고 보고¹⁰⁾하였다. 금강하류부의 수질변화에 관한 연구¹¹⁾와 최근 금강에서의 부영양화 현상에 관한 연구²⁾에서 금강 수질이 3등급을 초과하였으며, 영양염 농도수준이 부영양상태를 나타낸다고 보고하였다.

본 연구는 자생BOD를 고려한 수정된 QUAL2E모델을 이용하여 금강수계 수질관리 대안을 제시하기 위한 기초조사로, 수질이 가장 저하되는 하계의 분류와 지류의 수질을 조사하고, 모델입력인자의 산출을 위해 실험을 통하여 조류성장속도 및 반포화상수를 도출하며, 또한 배양실험을 통해 Chl.a와 유기물항목간의 상관관계를 밝혀 조류에 의해 유발되는 자생 BOD를 평가하는 것이 목적이다.

2. 연구내용 및 방법

2.1. 대상유역 및 수질조사

본 연구는 금강하구둑을 기점으로 상류 130km 지점에 위치한 대청댐까지의 중·하류역 구간을 연구대상으로 하였다. 유입지천으로는 갑천, 미호천, 조천, 유구천 이하 소규모 지천이 많이 있다. 현장조사는 본류 6개 지점과 지천 4지점을 대상으로 하계 갈수기인 6월에 수질조사를 실시하였다. 본류 지점은 대청 조정지댐 지점과 갑천과 미호천이 유입된 금남지점, 부여지점과 공주지점, 금강물이 저류되는 강경지점, 최하류부인 군산하구둑 지점으로 정하였으며, 지천은 갑천, 미호천과 그 지류인 조천, 유구천으로 정하였다(Fig. 1).

조류성장속도 측정 및 배양실험을 위하여 공주와 부여지점에서 시료를 채수하여 실험실에서 분석을 행하였다.

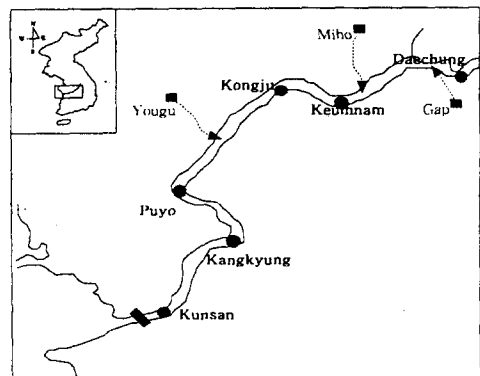


Fig. 1. Sampling stations in the Keum river.
(●:the Keum river, ■:Tributaries)

수질조사는 하계 수질이 악화되는 갈수기인 6월에 Fig. 1에서 제시된 지점에서 표층수를 채수하였으며, 수질분석은 Standard method¹²⁾와 수질오염공정시험법¹³⁾에 의해 정량분석 하였다.

수온과 pH는 봉상온도계와 pH meter(Orion 720A)를 이용하여 현장에서 측정하였고, 용존산소(DO)는 Winkler-azide 변법에 의해 정량하였다. 총부유물질(TSS)과 휘발성부유물질(VSS)은 GF/C 여과지에 일정량의 시수를 여과시킨 후 105~110℃에서 항온건조 후 항량의 무게차이와 500℃의 전기로에서 회화시킨 후 항량의 무게로 구하였다. 암모니아질소(NH₄⁻-N)는 Indophenol법으로, 아질산질소(NO₂⁻-N)는 NED법으로, 질산질소(NO₃⁻-N)는 카드뮴환원법에 의해 비색정량하였고, 총무기질소(TIN)는 NH₄⁻-N + NO₂⁻-N + NO₃⁻-N의 합으로 구하였다. 인산인(PO₄³⁻-P)은 Ascorbic acid 법에 의한 비색정량으로 측정하였고, 총인(TP)은 과황산칼륨에 의한 산화분해 후 인산인 정량으로 측정하였다. 생화학적 산소요구량(BOD)은 20℃ 5일간 배양 중의 산소소모량으로 측정하였으며, 용해성BOD(SBOD)는 Whatman GF/C 여과지를 이용하여 일정량의 시수를 여과시킨 후 여과액에 대한 20℃, 5일간 배양 중의 산소소모량으로 측정하였다. 화학적 산소요구량(COD)은 산성 과망간산칼륨 법으로 측정하였고, 용해성COD(SCOD)는 Whatman GF/C 여과지를 이용하여 일정량의 시수를 여과시킨 후 여과액에 대해 산성 과망간산칼륨법으로 측정하였다. 클로로필 a(Chlorophyll a)는 Strickland & Parson법¹⁴⁾에 의한 비색정량하였고, 유기질소(TKN)는 환원중류 킬달법으로 측정하였다. 입자성BOD(PBOD) 및 입자성COD(PCOD)는 BOD와 COD 값에서 Soluble BOD와 Soluble COD를 뺀 값으로 구하였다.

2.2. 모델 입력인자 산정

2.2.1. 식물플랑크톤의 영양염류 섭취속도 및 비성장속도

식물플랑크톤의 영양염류 섭취속도 및 비성장속도 측정을 위하여 부여와 공주지점에서 채수 후 실험실로 운반하여 동물 플랑크톤의 포식을 막기 위하여 200 μm net로 여과하여 동물플랑크톤을 제거한 다음 사용하였다. 식물성 플랑크톤의 성장에 필요한 영양염 보충을 위하여 여기에 무기영양염(NH₄Cl, K₂HPO₄)을 첨가하여 실시하였다. 무기영양염의 초기농도가 암모니아성 질소의 경우 40 μM 이상, 인산인의 경우 5 μM 이상 되도록 투입하였다. 빛은 항온기내에 조명시설을 설치하여 조도 7000lux 이상으로 하였고 수온은 항온기를 이용하여 25℃로 일정하게 유지시켰다. 영양염을 첨가한 후 Chl.a 및 영양염의 초기농도를 측정된 다음 12시간 간격으로 계속 반복하여 측정하였다.

질소와 인의 섭취율(uptake rate : V)과 반포화상수(Ks)는 Michaelis-Menten식¹⁵⁾으로 구하였으며, 최대섭취율(Vmax)과 반포화상수(Ks)값은 직선식으로 변형하여 계산하여 구하였다^{16,17)}.

$$V = V_{\max} \frac{S}{K_S + S}$$

여기서, V = 섭취속도 (μM/hr)

Vmax = 최대섭취속도 (μM/hr)

S = 영양염 농도 (μM)

Ks = 반포화상수 (at V=Vmax/2)(μM)

최적온도와 빛 조건하에서 단일 제한 영양염에 대한 조류 성장 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mu = \mu_{\max} \frac{S}{K_S + S}$$

여기서, μ = 섭취속도 (day⁻¹)

μ max = 최대섭취속도 (day⁻¹)

S = 영양염 농도 (μM)

Ks = 반포화상수 (μM)

식물성 플랑크톤의 비성장속도 (specific growth rate : μ)는 영양염에 대한 Chlorophyll a의 증가량으로 산출한 다음 질소와 인의 섭취율 (uptake rate : V)과 같은 방법으로 직선 식의 기울기와 X축의 음의 절편으로 최대 비성장속도(μ max) 및 반포화상수(K_N, K_P)^{18,19,20)} 값을 구할 수 있다.

2.2.2. 자생BOD 평가를 위한 배양실험

금강수계의 자생BOD 평가를 위하여 배양실험을 통하여 조류와 BOD와의 관계를 조사하였다.

일반적으로 배양실험에 대한 기준은 없으나, 본 연구에서는 이⁶⁾가 낙동강을 대상으로 실험한 방법을 기준으로 실시하였으며, 영양염 첨가여부는 현장의 영양염 조건과 영양염이 첨가된 조건의 비교를 위하여 실시하였다.

배양실험은 공주와 부여에서 채수한 시수에 대하여 이루어졌으며, 각 정점의 시수는 200μm의 zooplankton net를 사용하여 zooplankton을 제거한 후, 영양염 공급을 위해 N을 0.6mg/ℓ, P를 0.15mg/ℓ를 더 첨가한 시료수와 첨가하지 않은 시료수로 나누어 20ℓ 유리병에 10ℓ씩 채운 다음 BOD부란기에 넣어 배양실험을 하였다. 빛은 형광등을 사용하여 조도 7000lux 이상이 되게 하였고, 온도는 약 25±0.5℃로 일정하게 유지하였다.

배양 후 조류의 성장에 맞춰 24시간 간격으로 측정하였고, 측정항목으로는 Chlorophyll a, BOD, COD를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 본류의 수질특성

금강 중하류역의 하계 수질특성을 조사하기 위해 대청댐 하류측에서부터 군산하구둑까지 6개 지점에서 시료를 채수하여 분석한 결과를 Table 1 및 Fig. 2에 나타내었다.

수중 용존산소 농도를 결정하는 주요인자로는 BOD로 표현되는 수중 유기물의 미생물 분해작용에 의한 용존산소의 소모와 식물성 플랑크톤의 광합성 및 호흡작용에 의한 변화, 수온에 따른 수중 용존산소 포화도의 차이에 따른 재포화가 있다.

용존산소는 7.10~9.28mg/ℓ(평균 7.90mg/ℓ)로써 하천

의 수질기준 1급수에 해당되었다. 용존산소의 지점별 변화에서 조류가 많이 증식된 강경지점에서 높은 DO를 나타내었다.

BOD의 농도변화는 1.16~6.54mg/ℓ (평균 4.42mg/ℓ)를 나타내었으며, 대청댐 하류측을 제외하고는 전체가 하천 수질기준 3~4급수에 해당하였다. 금남지점의 높은 BOD 농도는 갑천과 미호천의 영향으로 나타났으며 이후 감소하다가 강경지점에서 다시 높은 값을 보였는데 이는 조류증식에 의한 것으로 판단된다. 용해성BOD(SBOD)는 1.05~2.29mg/ℓ의 범위로 총BOD중에서 용해성BOD(SBOD)의 비율이 평균 47.39%로 나타났다. 입자성BOD(PBOD)의 경우 대청지점에서 가장 낮고 갑천과 미호천의 영향을 받는 금남지점과 하구둑의 영향으로 단시간 물이 저류되는 강경지점에서 높은 값을 나타내었다. 금남지점의 PBOD 분율은 미호천의 영향에 의한 외래성 BOD에 기인하여 높게 나타났으며, 강경에서의 PBOD 분율이 높은 것은 조류에 의한 자생BOD의 영향인 것으로 판단된다. 이는 Chl.a의 농도가 강경에서 높게 나타난 것으로 추측할 수 있다. 또한, Chl.a, BOD, COD, PBOD, PCOD가 금남지점 이후로는 유사한 경향을 보여 식물플랑크톤의 성장이 COD상승에도 기여할 뿐 아니라, BOD 농도에도 기여하고 있음을 알 수 있다.

COD의 농도는 3.64~8.96mg/ℓ (평균 6.41mg/ℓ)를 나타내었고, 용해성COD(PCOD)는 1.92~4.32mg/ℓ (평균 3.50mg/ℓ)를 나타내었다. COD와 PCOD의 경향은 거의 일정하며 금남지점 이후로는 Chl.a와도 경향이 일치되는 것으로 나타났다. 일반적으로 COD 농도는 오염원이 유입하는 수역에서 최고 농도를 보이고 이후 하류역으로 갈수록 하천의 자정작용에 의해 점점 농도가 감소하는 경향을 나타내나, 본 수역에서는 자생 유기물의 영향으로 인하여 강경에서 증가하는 경향을 보였다. 이는 금강하구둑 수문 차단으로 인한 강경지점에서의 담수정체 및 체류시간의 증가로 인하여 나타난 것으로 판단된다.

조류성장의 인자로 작용하는 질소의 농도를 보면, 암모니아질소의 농도는 0.0000~0.5753mg/ℓ (평균 0.2758mg/ℓ) 였으며, 갑천과 미호천이 유입된 금남지점에서 높은 값을 나타냈다. 질산질소는 2.6076~4.1052mg/ℓ (평균 3.2977mg/ℓ), 아질산질소는 0.0171~0.2874mg/ℓ (평균 0.1738mg/ℓ)를 나타내었다. 총무기질소가 금남지점에서 상승되어 하류로 갈수록 감소되는 것으로 나타났다. 총무기질소의 변화에서 조류성장과 관계가 있는 것으로 나타났다.

유기질소는 0.0000~0.5145mg/ℓ (평균 0.3717mg/ℓ)를 나타내었고, 갑천과 미호천의 영향을 받는 금남지점에서 가장 높고 이후 감소하는 경향을 나타내었다.

인산 인의 농도범위는 0.0076~0.2461mg/ℓ (평균 0.1483mg/ℓ)로 갑천과 미호천이 유입된 금남, 공주지점에서 높았고 하류로 갈수록 감소되는데 경향을 보였다. 이는 Chl.a와 역상관 관계를 가지고 있어 Chl.a의 증식에 인산 인이 중요한 인자임을 알 수 있다. 총인의 농도범위는 0.0178~0.2841mg/ℓ (평균 0.1828mg/ℓ)로 나타났으며 인산인과 비슷한 경향을 나타냈다.

식물플랑크톤의 현존량을 나타내는 Chl.a의 농도는 1.51~68.78mg/ℓ (평균 31.08mg/ℓ)로 나타났고, 상류에서 하류로 갈수록 증가되며 특히 갑천과 미호천 유입지점인 금남지점에서 부터 서서히 증가하여 강경지점에서 최고 값을 나타내었다. 특히 강경지점에서 높게 나타난 것은 금강하구둑 수문차단 후 하천수의 정체 및 체류시간의 증가에 기인한 것으로 판단된다.

Table 1. The analysis results of water quality in the Keum river, 1998.6

St.	Temp (°C)	pH	DO		mg/L				Chl.a (µg/l)	
			()	()	BOD	SBOD	COD	SCOD		
Daechung	16.0	7.75	7.16	1.86	0.29	1.16	1.05	3.64	1.92	1.51
Keumnam	19.0	7.61	7.10	22.4	6.40	6.40	2.15	8.96	3.84	26.27
Kongju	19.0	7.67	8.02	19.2	5.00	4.47	1.18	5.88	4.08	28.06
Puyo	17.3	7.93	8.23	20.2	6.00	5.10	2.29	6.52	3.60	41.72
Kangkyung	18.0	7.85	9.28	19.4	5.00	6.54	1.82	8.12	4.32	68.78
Kunsan	19.5	7.73	7.58	16.2	3.60	2.83	1.73	5.84	3.24	20.10

St.	mg/L				Org-N	PO ₄ ³⁻ -P	TP
	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	NO ₂ ⁻ -N	TIN			
Daechung	ND	2.6076	0.0171	2.6247	ND	0.0076	0.0178
Keumnam	0.5753	4.1052	0.2874	4.9679	0.4773	0.1859	0.2508
Kongju	0.3166	3.479	0.2408	4.0964	0.5145	0.2461	0.2841
Puyo	0.3370	3.5443	0.1786	4.0599	ND	0.2133	0.2576
Kangkyung	0.0749	3.1331	0.1825	3.3905	0.4175	0.1504	0.1820
Kunsan	0.2077	2.2957	0.1359	2.6383	0.1518	0.0861	0.1043

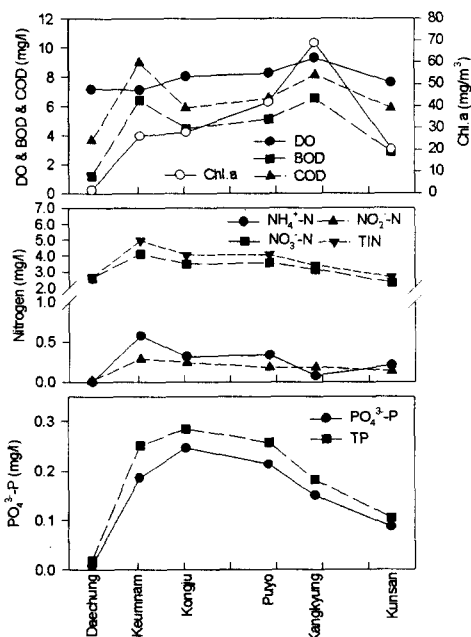


Fig. 2. The variations of water quality in the Keum river, 1998. 6.

3.2. 지류의 수질특성

금강으로 유입되는 지천의 수질특성을 조사하기 위하여 1998년 6월에 갑천, 조천, 미호천, 유구천 4개의 지천에서 수질조사를 실시한 결과를 Table 2에 나타내었다.

유입지천별 용존산소 농도변화는 6.86~8.89mg/l로 나타났다. 유구천이 다른 지천에 비해 높게 나타났으며 하천수질기준과 비교해 볼 때 2급수에 해당하는 것으로 나타났다.

BOD 변화를 살펴보면 유구천이 2.51mg/l 이고 미호천은 6.22mg/l, 갑천이 6.69mg/l, 조천이 2.58mg/l로 나타났다. 하천수질기준과 비교해 볼 때 갑천과 미호천은 4급수에 해당되는 값을 나타내었고, 유구천과 조천은 2급수에 해당되는 것으로 나타났다.

대청댐 하측지점에서 BOD가 1.16mg/l 이었으나 갑천과 미호천이 유입된 후인 금남지점에서는 6.4mg/l로 매우 큰 상승을 나타내어 갑천과 미호천이 금강분류 수질에 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있다. SBOD의 경우 갑천과 미호천이 각각 2.58mg/l, 2.49mg/l로 나타났으며 BOD에서 SBOD가 차지하는 비율이 38.6%로 나타나 외래성 유기물에 의한 PCOD의 영향이 매우 큰 부분을 차지하는 것으로 나타났다.

Table 2. The analysis results of water quality in tributaries ,1998.6

St.	Temp (°C)	pH	DO ()	TSS	VSS	BOD	SBOD	COD	SCOD	Chl.a
(mg/L) (µg/l)										
Jo	20.2	7.65	8.89	9.00	4.60	2.58	1.8	6.04	5.52	2.19
Miho	19.3	7.65	6.86	88.00	25.00	6.22	2.49	12.28	5.58	34.27
Gap	20.5	7.68	8.03	36.00	13.50	6.69	2.58	8.32	6.32	18.86
Yogu	19.5	7.86	8.32	18.20	5.60	2.51	0.15	5.88	3.44	17.39

St.	NH ₄ -N	NO ₃ -N	NO ₂ -N	TIN	Org-N	PO ₄ ³⁻ -P	TP
(mg/L)							
Jo	0.2043	2.3353	0.2019	2.7415	0.2803	0.1035	0.1043
Miho	0.3472	3.6021	0.4738	4.4231	0.5266	0.3842	0.7835
Gap	0.2349	4.1987	0.2874	4.721	0.1088	0.3691	0.3440
Yogu	N.D.	2.8094	0.1592	2.9686	N.D.	0.1053	0.1243

COD의 경우 미호천과 갑천에서 높은 농도를 보였고, 유구천에서 낮은 농도를 보였으며, SCOD도 유사한 경향을 나타내었다. 특히, 미호천에서 PCOD/COD 비율이 평균 52.04 %로 나타나 다른 지천에서 나타나는 높은 SCOD/COD 비율과 달리 입자성 COD의 영향이 가장 큰 것으로 나타났다.

TSS와 VSS를 살펴보면, TSS가 9.0~88.0mg/l로 나타났으며 VSS는 4.6~25mg/l로 나타났다. 하천수질기준과 비교해 볼 때 갑천과 미호천은 4급수에 해당되었고, 미호천에서 유입되는 부유물질의 양이 지천 중 가장 큰 것으로 나타났다. 유기물 농도의 간접적인 지표가 되는 VSS/TSS 비는 32.23%를 나타내었다.

지류에서의 질소의 농도분포를 보면, 암모니아질소는 0.0000~0.3472mg/l의 범위로서 유구천에서의 낮은 농도를 보였고, 갑천과 미호천에서 높은 농도를 나타내었다. 질산질소는 2.8094~4.1987mg/l의 농도 범위로서 암모니아질소보다 높은 농도를 보였고, 아질산질소는 0.1592~0.4738mg/l의 범위로 일반 하천수계에서 나타나는 농도보다 높아 오염물질의 분해작용이 활발하게 일어나고 있음을 알 수 있다.

인산 인의 농도범위는 0.1035~0.3842mg/l로서 미호천과 갑천에서 높은 농도를 보였고 특히 갑천이 높게 나타났다. 총인의 농도범위는 0.1043~0.7835mg/l를 나타내었다.

식물플랑크톤의 농도를 의미하는 Chl.a의 농도범위는 2.187~34.268mg/l였으며 미호천에서 34.268mg/l로 가장 높게 나타났다.

3.3 오염부하 특성

금강으로 유입되는 대표적인 지천은 갑천, 미호천, 유구천으로 각 지천으로부터의 오염부하량산출을 위하여 유량과 수질농도를 곱하여 구하였다. 지천의 유량은 금강홍수통제서²¹⁾에서 구한 1998년도 6월의 평균자료를 이용하였고, 수질은 하계 6월 측정자료를 이용하였다. 각 지천의 오염부하량 및 부여지점에 미치는 오염부하량 점유율 계산하여 Table 3 및 Fig. 3에 나타내었다. 본류의 부여지점 부하량 계산을 위하여 6월 유량 207m³/s와 본류 농도측정자료를 이용하였다. 점유율 계산시 지천유입 후 유하시간에 따른 자정작용에 의한 제거효과를 고려하지 않았다.

Table 3. Pollutant loading and occupancy percentage of tributaries in June, 1998.

Station	Flowrate m ³ /sec	COD	BOD	VSS	NH ₄ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N	PO ₄ ³⁻ -P	Chl.a
(kg / day)									
(% occupancy)									
Gap cheon	21.62 (10.5)	15641.49 (13.3)	12496.71 (13.7)	25217.57 (23.5)	438.79 (7.3)	536.85 (16.8)	7843.04 (12.4)	689.47 (18.1)	35.06 (4.7)
Miho cheon	52.95 (25.6)	56179.53 (48.2)	28455.75 (64.1)	114372.0 (106.6)	1588.40 (26.4)	2167.58 (67.9)	16479.18 (26.0)	1757.67 (46.1)	156.77 (21.0)
Yogu cheon	12.73 (6.2)	6467.25 (5.6)	2760.68 (3.0)	6159.28 (5.7)	0.0000 (0.0)	175.10 (5.5)	3089.98 (4.9)	115.82 (3.0)	19.12 (2.6)
Total	87.30 (42.2)	78188.27 (67.1)	43713.14 (80.8)	145748.85 (135.8)	2027.19 (33.6)	2879.53 (90.2)	27412.20 (43.3)	2562.96 (67.2)	210.95 (28.3)

대전시의 도시하수처리장에서 처리된 후 방류되는 갑천의 오염부하 특성은 유량점유율이 10.5%인데 비하여 BOD 점유율이 평균 13.7%, Chl.a 점유율이 4.7%로 낮게 나타났다. 청주와 신탄진지역의 미처리된 생활하수가 유입하는 미호천의 오염부하 특성을 보면, 유량점유율이 25.6%이나 BOD와 COD 점유율은 각각 64.1%와 48.2%로 높게 나타났으며, 영양염류 점유율은 질소의 경우 평균 40.1%, 인산 인은 46.1%로써 금강의 부영양화에 가장

큰 영향을 미치는 지천으로 판단되었다. 특히 VSS의 경우 부여지점 총부하량의 106.6%가 미호천에 의해 유입되는 것으로 나타났는데 이는 부유물질의 침강작용을 고려하지 않았고 산술적으로 평가하였기 때문이다.

반면 상대적으로 오염원이 적은 유구천의 경우 전체적으로 5%미만의 낮은 오염부하 점유율을 가졌다.

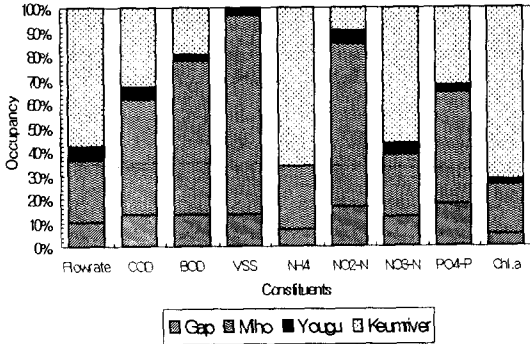


Fig. 3. Occupied Percentage of pollutant loading from tributaries in June.

3.4. 조류와 영양염류 섭취

금강 수계에서 식물 플랑크톤에 의한 영양염류 섭취 속도를 구하기 위하여 유속이 느리고 일사량이 많으며 영양염이 풍부한 갈수기인 6월에 금강 본류 2개 지점을 선정하여 영양 염류 섭취에 따른 식물 플랑크톤의 성장 속도를 실험적으로 도출한 실험 결과를 Table 4에 나타내었다.

1) 영양염섭취속도 및 반포화상수

금강 수계의 지점별 식물 플랑크톤에 의한 영양염 섭취 속도는 Chl.a가 증가함에 따라 암모니아질소와 인산 인은 급격히 감소하여 대부분 조류에 의해 섭취되는 것으로 나타났다. 금강 수계의 식물 플랑크톤은 암모니아성 질소의 기질농도가 0.0643~62.1357 μM범위에서 0.4368~0.4432 μM/hr(평균 0.44 μM/hr)의 최대섭취율을, 인산 인의 기질농도 1.000~9.161 μM의 범위에서 0.0962~0.2341 μM/hr(평균 0.1652 μM/hr)의 최대섭취율을 나타내었다. 그리고 반포화상수 (K_s)를 구한 결과 암모니아질소는 2.4401~2.9428 μM, 인산 인은 0.4913~4.7421 μM 로 나타났다.

이는 박²²⁾이 낙동강 수계를 대상으로 실험한 결과 나타난 암모니아성 질소의 기질농도 40~70 μM의 범위에서 구한 최대섭취율 2.14~4.20(평균 3.03) μM/hr과 인산 인 기질농도 5~7 μM의 범위에서 구한 최대섭취율 0.24~0.39(평균 0.32) μM/hr과 비교하면 낮은 섭취율을 나타내었다.

반포화상수값도 낙동강에서 구한 암모니아성질소 6.89~24.31 μM과 인산인 1.24~2.49 μM과 비교하면, 암모니아성질소에서는 낮은 값을 보였으나, 인산인은 비슷하였다.

Table 4. Variations of Chl.a, NH₄⁺-N and PO₄³⁻-P during examine periods

St.	Time (hour)	Chl.a (mg/m ³)	NH ₄ ⁺ -N and PO ₄ ³⁻ -P (μg · at/L)	
			NH ₄ ⁺ -N	PO ₄ ³⁻ -P
Kongju	0	6.57	54.78	7.52
	12	9.26	50.13	4.58
	24	19.96	44.53	3.87
	36	31.34	37.11	2.03
	48	74.28	11.81	1.16
	60	116.15	5.88	0.65
	72	140.08	1.28	0.32
	84	170.58	0.06	0.10
	Puyo	0	4.34	62.14
12		8.10	59.67	8.03
24		21.07	54.78	7.33
36		34.30	52.62	6.50
48		58.60	32.92	5.97
60		91.60	25.71	3.94
72		165.09	20.44	1.65
84		176.48	12.61	0.58

2) 비성장속도 및 반포화상수

실험을 통하여 산출된 공주와 부여의 비성장속도 및 반포화상수 값을 Table 5, 6에 나타내었다.

식물플랑크톤에 의한 지점별 최대 비성장속도는 0.9332 ~ 1.7704hr⁻¹ 범위였다. 조류 성장에 대한 암모니아질소의 반포화상수(K_N)는 공주 지점에서는 0.9091 μM를 나타내었고 부여 지점에서는 4.2763 μM 로 두 지점간에 큰 차이를 나타내었다. 인산 인의 반포화상수(K_P)는 공주지점에서는 1.6392 μM 이고 부여에서는 1.2130 μM 로 나타났다.

이는 박²²⁾이 낙동강에서 조사한 최대 비성장속도 1.0776~3.1368 day⁻¹ 보다 낮은 값을 보였으나, Chen & Orlob²⁰⁾, Chen²¹⁾, Chen & Wells²⁴⁾ 등이 조사한 1.0~2.5 day⁻¹과 비슷한 값을 나타내었다.

Table 5. Uptake rate and half-saturation constant for ammonia nitrogen and phosphate in each station

St	Ammonia		Phosphate	
	Vmax (μM/hr)	K _N (μM)	Vmax (μM/hr)	K _P (μM)
Kongju	0.4432	2.4401	0.2341	4.7421
Puyo	0.4367	2.9428	0.0962	0.4913
Mean	0.44	2.6915	0.1652	2.6167

Table 6. Specific growth rate and half-saturation constant for ammonia nitrogen and phosphate in each station

St	Ammonia		Phosphate	
	μ max (hr ⁻¹)	K _N (μ M)	μ max (hr ⁻¹)	K _P (μ M)
Kongju	0.9332	0.9091	1.7704	1.6392
Puyo	1.5717	4.2763	1.2649	1.2130
Mean	1.2525	2.5927	1.5177	1.4261

3.5. 배양실험

1) Chlorophyll a와 BOD의 관계

배양실험에서 지점별 Chlorophyll a와 BOD와의 관계를 Fig. 4에 나타내었고, 상관관계식과 상관계수는 Table 7에 나타내었다.

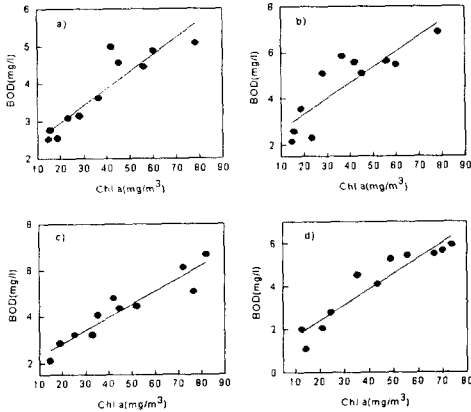


Fig. 4. Correlationship between Chl.a and BOD during culture periods.

a) adding nutrients, Kongju b) adding nutrients, Buyo
c) no adding nutrients, Kongju d) no adding nutrients, Buyo

Table 7. Regression equation and Correlation coefficients between Chl.a and BOD during culture periods

Station	Case1 (N=11)		Case2 (N=11)	
	Regression equation (R)	Regression equation (R)	Regression equation (R)	Regression equation (R)
Kongju	Y=0.045X + 2.065 (0.911)	Y=0.056X + 1.721 (0.942)		
Buyo	Y=0.071X + 1.094 (0.935)	Y=0.073X + 0.913 (0.947)		

Case 1 : Culture with adding nutrients

Case 2 : Culture with no adding nutrients

N : The number of test, Y : BOD(mg/L), X : Chl. a(μ g/L)

영양염을 첨가한 실험의 경우 각 지점에서 Chlorophyll a와 BOD의 상관계수가 공주에서 0.911, 부여에서 0.935로 아주 양호한 상관관계를 보여주었고, 이때 Chlorophyll a에서 BOD로의 전환계수는 공주에서 0.045, 부여에서 0.071로 나타났다. 영양염을 첨가하지 않은 실험의 경우 각 지점에서 Chlorophyll a와 BOD의 상관계수는 공주에

서 0.942, 부여에서 0.947로 대체적으로 양호한 상관관계를 보여주었고, 이때 Chlorophyll a의 BOD전환계수는 공주에서 0.056, 부여에서 0.073을 보였다.

이는 이⁽⁶⁾가 낙동강에서 조사한 영양염을 첨가한 경우 0.069~0.075와 영양염을 첨가하지 않은 경우 0.032~0.036과는 다소 다른 양상으로 보였으나, 전환계수는 영양염을 첨가한 경우에는 평균 0.068로 비슷하였고, 영양염을 첨가하지 않은 조건에서는 평균 0.064로 다소 높은 값을 나타내었다.

2) Chlorophyll a와 COD의 관계

배양실험에서 각 지점별 Chlorophyll a와 COD의 상관관계는 Fig. 5에 나타내었고, 상관관계식과 상관계수는 Table 8에 나타내었다.

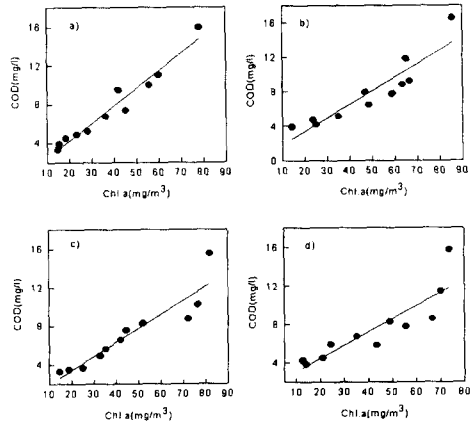


Fig. 5. Correlationship between Chl.a and COD during culture periods.

a) adding nutrients, Kongju b) adding nutrients, Buyo
c) no adding nutrients, Kongju d) no adding nutrients, Buyo

Table 8. Regression equation and Correlation coefficients between Chl.a and COD during culture periods

Station	Case1 (N=11)		Case2 (N=11)	
	Regression equation (R)	Regression equation (R)	Regression equation (R)	Regression equation (R)
Kongju	Y=0.182X + 0.564 (0.977)	Y=0.145X + 0.497 (0.931)		
Buyo	Y=0.158X + 0.199 (0.918)	Y=0.137X + 1.702 (0.880)		

Case 1 : Culture with adding nutrients

Case 2 : Culture with no adding nutrients

N : The number of test, Y : COD(mg/L), X : Chl. a(μ g/L)

영양염을 첨가한 실험의 경우 각 지점에서 Chlorophyll a와 COD의 상관계수는 공주에서 0.977, 부여에서 0.918로 좋은 상관관계를 보여주었고, 이때 Chlorophyll a에서 COD로의 전환계수는 공주에서 0.182, 부여에서 0.158로 나타났다. 영양염을 첨가하지 않은 실험의 경우 각 지점

에서 Chlorophyll a와 COD와의 상관계수는 공주에서 0.931, 부여에서 0.880으로 대체적으로 양호한 상관관계를 보여주었고 이때 Chlorophyll a와 COD와의 전환계수는 공주에서 0.145, 부여에서 0.137로 유사한 값을 보였다.

이는 이⁶⁾가 낙동강에서 조사한 영양염을 첨가한 경우 0.049~0.065와 영양염을 첨가하지 않은 경우 0.038~0.053보다는 높은 전환율을 나타내었다.

3.6. 모델에서의 자생BOD의 수식화

금강과 같이 부영양화된 하천에서의 BOD측정값에는 첫째, 오염원으로부터 미 처리된 채 하천수로 유입한 유기물이 물리, 화학, 생물학적 작용을 받아 특정 농도 값을 갖게 되는 유입BOD와 둘째, 오염원으로 유입한 질소, 인과 같은 영양염을 이용하여 생산된 식물플랑크톤에 의한 자생유기물이 BOD측정결과로 나타내는 자생 BOD의 합으로 나타난다.

오염원으로부터 미 처리된 질소나 인 등이 수계로 유입되면서 식물플랑크톤에 의하여 2차 유기물을 생산하고 이 유기물을 수질모델에 고려하기 위한 시도가 이루어져 왔다.

Bace²⁵⁾ 등은 부영양화된 호소에서 식물플랑크톤과 동물플랑크톤의 사망률을 고려한 자생 BOD를 구하기 위한 식을 제안하였다. Thomann²⁶⁾은 부영양화된 Potomac 강 하구에서 수계 내에서 동물플랑크톤에 의해 포식되지 않은 식물플랑크톤의 사망률을 이용하여 식을 제안하였다. 하천과 호수 모두에 적용할 수 있는 WASP4 수질모델²⁷⁾에서는 식물플랑크톤에 의한 자생 BOD를 포함한 BOD를 bottle BOD라 하여 식물플랑크톤의 호흡률로부터 5일간의 배양기간 중의 산소소모량으로 표현하였다. 호수에 대한 수질모델인 MINLAKE 모델²⁸⁾에서는 Chl.a양으로부터 각 유기물 항목간의 중량비를 이용하여 BOD₅ 농도로 환산하였다.

그러나, QUAL-2E 모델에서는 자생 BOD에 대한 고려함이 없어, 본 연구에서는 신⁷⁾이 연구한 낙동강 유역에서의 식물플랑크톤에 의한 자생 BOD의 영향을 고려한 수식을 이용하여 자생 BOD 평가한다.

$$\begin{aligned} \text{BOD} &= \text{Allochthonous BOD} + \text{Autochthonous BOD} \\ \text{Autochthonous BOD} &= \beta 5 \cdot \text{Chl.a} \end{aligned}$$

여기서, $\beta 5$: 전환계수 (Autochthonous BOD/Chl.a)

본 연구에서 산출된 식물플랑크톤의 전환계수를 보면, Chlorophyll a의 BOD로의 전환율이 0.045~0.073(평균 0.063)을, COD로의 전환율이 0.137~0.182(평균 0.151)로 나타났다.

4. 결 론

자생 BOD를 고려한 금강 수질관리 대안을 제시하기 위한 기초조사로서, 하계의 금강 본류와 지류의 수질특성을 조사하고, 영양염과 Chl.a와의 관계를 통한 조류성장속도 및 반포화계수의 도출과 Chl.a와 유기물항목간의 상관관계에 의한 자생 BOD를 조사한 결과를 요약하면

다음과 같다.

금강의 하계 수질은 BOD의 경우 3~4급수에 속하였고, 하천수의 영양상태가 매우 높아 부영양하천의 특성을 나타내고 있었다.

지천의 오염부하량은 부여지점에 대해 미호천이 BOD 64.07 %, 암모니아 질소가 26.36 % 그리고 인산 인이 46.08 %인 것으로 나타나 금강의 수질에 가장 큰 영향을 미치는 지천으로 나타났다.

조류에 의한 영양염 최대섭취속도는 암모니아질소 기질에 대하여 0.4400 $\mu\text{M/hr}$ 이고, 인산 인 기질에 대해서는 0.1652 $\mu\text{M/hr}$ 로 최대섭취속도를 나타내었다.

조류의 비성장속도는 암모니아질소 기질에 대하여는 1.2525 hr^{-1} 로 나타났으며 인산 인 기질에 대해서는 1.5177 hr^{-1} 로 비성장속도를 나타내었다.

배양실험에서 Chl.a와 BOD의 상관계수는 영양염을 첨가한 경우 0.911~0.935, 영양염을 첨가하지 않은 경우 0.942~0.947로 나타났다. Chl.a와 COD의 상관계수는 영양염을 첨가한 경우 0.918~0.977, 영양염을 첨가하지 않은 경우 0.880~0.931로 나타났다.

자생 BOD를 평가하기 위한 배양실험 결과, Chlorophyll a의 BOD로의 전환율이 0.045~0.073(평균 0.063)을, COD로의 전환율이 0.137~0.182(평균 0.151)의 계수값을 나타내었다.

참 고 문 헌

- 1) Chung, J. Y., J. H. Lee and H. S. An., 1983, Circulation Dynamics of the Keum River Estuary I. Variability of the Salinity Boundary Layer. J. Oceanogr. Soc. Korea, 18(2).
- 2) 유선재, 김종구, 권태연, 이석모, 1999, 금강의 부영양화 현상에 관한 연구, 한국환경과학회지, 8(2), 155~160.
- 3) Bace, R. G. and Amet, 1976, A Limnological Model for Eutrophic Lakes and Impoundments. Battelle Inc., Pacific Northwest Laboratories, Richard, Washinton.
- 4) Fallon, R. D. and Thomas, D. B., 1979, Decomposition of Blue-Green Algae(cyanobacterial) Blooms in Lake Mentota, Wisconsin. Applied and Environ. Microbiology, 37(5), pp820-820.
- 5) Nakanishi, Airoshi, 1993, Inflowing Pollution Loads relating to Eutrophication of Water Bodies and their Control. Forum of the Seto Island Sea, (3), pp. 31-43.
- 6) 이수용, 1995, 낙동강에서의 Chlorophyll a 와 BOD와의 상관관계, 석사학위논문, 부경대학교.
- 7) 신성교, 1996, 자생 BOD를 고려한 낙동상의 수질관리, 석사학위논문, 부경대학교.
- 8) 백경훈, 1998, 낙동강유역의 수질오염 부하량산정. 석사학위논문, 부경대학교.
- 9) 양한섭·김성수, 1990, 금강하류역에서 수질의 시공간

- 적 변화특성. 한국수산학회지, 23(3).
- 10) 이문찬, 1990, 금강하구둑 건설 전후의 해양환경 변화에 관한 연구. 조선대학교 지구과학과 석사학위논문.
 - 11) 최병현, 1993, 금강하류부 수질변동에 관한 연구. 전북대학교 환경공학과 석사학위논문
 - 12) APHA, AWWA, WPCF, 1989, Standard methods for the examination of water and wastewater. 17th ed.
 - 13) 동화기술편집부, 1994, 수질오염공정시험방법. 동화기술.
 - 14) Strickland, J. D. H. and T. R. Parsons, 1972, A practical handbook of seawater analysis. 185, Fish. Res. Board. Can. Bull. No.167.
 - 15) Michaelis, L. and M.L. Menten, 1913, Biochemische zeitschrift. 49.
 - 16) Thomann, R. V., D. M. DiToro and D. J. O'Connor, 1974, Preliminary Model of Potomac Estuary Phytoplankton. ASCE, J. Environ. Engr.div, Vol 100.
 - 17) DiToro, D. M. and J. F. Connolly, 1980, Mathematical Models of Water Quality in Large Lakes. Part II.
 - 18) Salas, H. J. and R. V. Thomann, 1978, A Steady state Phytoplankton Model of Chesapeake Bay. Journal WPCF, Vol 50, No 12.
 - 19) DiToro, D. M. and W. F. Matystic, Jr, 1980, Mathematical Models of Water Quality in Large Lakes. Part I.
 - 20) Chen, C. W. and G. T. Orlob, 1975, Ecologic Simulation for Aquatic Environment. System Analysis and Simulation in Ecology, Vol 3.
 - 21) 금강홍수통제소, 1998, 금강수위자료.
 - 22) 박해영, 1992, 낙동강에서의 영양염 분포특성에 관한 연구, 부산수산대학 석사학위논문, p36-42
 - 23) Chen, C. W., 1970, Concepts and Utilities of Ecological Model, ASCE Jour. of the Sanitary Eng. Divi., 96(SAS).
 - 24) Chen, C. W. and J. T. Wells, 1976, Boise River Modelling, In Modelling biochemical processes in Aquatic Ecosystems, R. P. Canale(Ed.), Ann Arbor Science Publishers, Ann Arbor, Michigan, pp171-204.
 - 25) Bace, R. G. and R. C. Amet, 1976, A Limnological Model for Eutrophic Lakes and Impoundments. Battelle Inc.
 - 26) Thomann, R. V. and J. J. Fitzpatrick, 1998, Calibration and Verification of a Mathematical Model of the Eutrophication of the Potomac Estuary Government of the Dostrict of Columbia.
 - 27) Ambrose, Jr. R. B., T. A. Wool, J. P. Conolly and R. W. Schanz, 1988, WASP4 : A Hydrodynamic and Water Quality Model - Model Theory, Users Manual and Programmer's Guide. EPA.
 - 28) Riley, M. J., 1988, User's Manual for the Dynamic Lake Water Quality Simulation Program 'MINLAKE'. University of Minnesota, St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory.