

## 금강 중하류에서의 수질모의에 관한 연구

### A Study on the Water Quality Simulation in the Midstream and Downstream of Geum-River

신 재 기\* / 임 창 수\*\*

Shin, Jae-Ki / Rim, Chang-Soo

#### Abstract

The Water Quality Analysis Simulation Program 5 (WASP5) and HEC-2 models have been coupled and applied to find the possibility of simulation of long-term river water quality variation. The EUTRO5 as a simulator of water quality simulation in WASP5 model was used to simulate the water quality variables in the downstream of Geum-River from Daechung multi-purpose dam during the dry period. The water quality and flow rate conditions have been measured at the stage measurement stations located in the downstream of Geum-River from Daechung dam in December, 1998 and January and March, 1999. The water quality simulation model was calibrated with January data of 1999, and verified with December data of 1998 and March data of 1999. The trend of longitudinal variation of water quality variables simulated by model is consistent with that of measured water quality constituents except chlorophyll-a, BOD<sub>5</sub>, NH<sub>3</sub>-N and PO<sub>4</sub>-P simulated with March data of 1999. Furthermore, the chlorophyll-a concentration in the mainstream of Geum-River was simulated by changing the concentrations of PO<sub>4</sub>-P and/or NH<sub>3</sub>-N flowing into the mainstream of Geum-River from Gabcheon and Mihocheon. The variation of chlorophyll-a concentration in the mainstream was almost ignorable except only when NH<sub>3</sub>-N and PO<sub>4</sub>-P concentrations decreased by 70% flow into the mainstream from Gabcheon and Mihocheon.

*Keywords:* water quality simulation, Geum-river, WASP5, HEC-2

#### 요 지

본 연구에서는 금강 대청댐하류의 분류구간에서 갈수기간에 대해서 WASP5모형 중에서 수질모의 부분인 EUTRO5모형과 1차원 정상류 수리모형인 HEC-2모형을 연계한 수질모형을 이용하여 대청조정지댐으로부터 강경수위표 지점까지 수질의 변화를 모의하였다. 수질 및 유량자료의 수집을 위하여 대청댐으로부터 금강하류에 위치한 주요 수위표지점에서 1998년 12월, 1999년 1월과 3월의 3회에 걸쳐 관측하였다. 수질모의모형은 1999년 1월 자료를 이용하여 보정되어지고, 1998년 12월자료와 1999년 3월자료를 이용하여 검증되어졌다. 모형에 의해서 모의된 수질변수들의 거리에 따른 변화는 1999년 3월자료를 이용하여 모의된 chlorophyll-a, BOD<sub>5</sub>, NH<sub>3</sub>-N, PO<sub>4</sub>-P와 같은 수질변수를 제외하고는 관측된 수질변수값과 거의 일치하였다. 또한 NH<sub>3</sub>-N과 PO<sub>4</sub>-P가 증가 혹은 감소되어 갑천과 미호천으로부터 금강본류로 유입된다고 가정하는 경우에 금강본류에서의 chlorophyll-a의 농도를 모의하였다. 모의한 바에 의하면 갑천과 미호천에서 NH<sub>3</sub>-N과 PO<sub>4</sub>-P가 70% 감소되어져 금강본류로 유입된다고 가정하는 경우를 제외하고는 거의 미미한 chlorophyll-a 농도변화율을 보였다.

**핵심용어 :** 수질모의, 금강, WASP5, HEC-2

\* 한국수자원공사 수자원연구소 연구원

Researcher, Water Resources Research Institute, Korea Water Resources Corporation, Taejon 305 390, Korea (Jaeki@kowaco.or.kr)

\*\* 정운대학교 토목환경공학과 전임강사

Full-Time Lecturer, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Chungwoon University, Hongsung, Chungnam 350 800, Korea

## 1. 서 론

담수의 부영양화, 영양염 증가와 이에 따른 영향은 20세기 중·후반에 환경문제 중 하나로 대두되었고 인위적 부영양화가 대부분을 차지하여 그에 대한 관심이 모아졌다(Harper, 1993). 경제·산업발전과 더불어 도시가 발달하고 인구가 집중되어 물 사용량이 급증되는 만큼 다양한 오폐수가 증가하게 되었다. 이로 인해 N과 P를 비롯한 유기물 오염은 날이 갈수록 더욱 심각해지고 있다. 수질오염 또는 부영양화는 단순하게 수질 그 자체만이 악화되는 것이 아니라 외부로부터 과다한 영양염 유입으로 인해 담수조류가 번성하고 내부 유기물량 증가로 수생태계에서 물질순환의 균형이 파괴되는 현상을 의미한다(Wetzel과 Likens, 1991).

우리 나라 수질오염은 하폐수종말처리시설이 충분하지 못하여 제대로 처리되지 못하고 하천으로 곧바로 유입되는 오폐수가 많아 부영양화를 더욱 가속시키는 인위적인 요인과 함께 자연적인 요인도 기여하는 바가 크다. 그 예로 하절기에 집중되어 있는 강수량의 대부분은 단시간에 유출됨으로서 이 시기를 제외하고는 유량이 극히 부족하다. 유량의 절대적 부족으로 갈수가 장기간 심화되고 이때 특히 하천의 자정작용이 원활하지 못해 수질관리가 더욱 어려운 실정이다.

금강 본류의 수질은 하천 하구에 배수갑문이 축조되어 강경하류로부터 반호수상태를 보이고 있으며 갑천과 미호천으로부터 유입되는 각종 오폐수의 영향이 절대적이다. 특히 N, P 농도가 높아 담수조류가 많이 발생하는 등 전형적인 과영양상태를 보이고 있다. 유선재 등(1999)이 금강 하구둑 수문조작 후인 1995년 8월부터 1996년 5월까지 금강의 중하류역을 중심으로 부영양화 현상 관련인자인 영양염류와 chlorophyll-a 양의 변동 및 관계를 조사한 바에 의하면, 금강 중하류역의 수질은 부영양화가 많이 진행되어 있으며, 특히 영양염류의 농도가 매우 높아 수계의 수질관리를 위하여 영양염에 대한 관리가 필요한 것으로 나타났다.

금강수역에 대한 기존의 수질모형을 이용한 연구를 살펴보면, 한국수자원공사(1993)에서 대청 조정지점부터 금강하구둑까지 QUAL2E-U 모형을 적용하여 수온, DO, BOD, SS, NH<sub>3</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, T-N, PO<sub>4</sub>-P 등을 모의 및 예측한바 있다. 또한 김규호 등(1996)은 금강하천 수질보전을 위한 필요유량 결정을 위하여 1994년 12월 1일부터 1995년 3월 22일까지 측정된 수질자료를 이용하여, 대청댐 조정지 하류에서

강경지점까지 수질을 예측하고 기존의 수질보전계획에 따른 수질환경기준을 만족하기 위한 필요유량을 산정하였다.

본 연구에서는 금강에서 오염물질이 부하되는 양상을 파악하기 위해 갈수기에 대청댐하류부터 강경까지 각종 수질분석을 하였고 특히 N, P 및 chlorophyll-a를 중심으로 수질오염 실태를 파악하였다. 또한 측정된 월별 수질 및 유량자료를 이용하여 한국수자원공사(1996)에서 낙동강유역에 적용한 바 있는 WASP5 수질모형과 HEC-2모형을 연계한 수질모의모형을 적용함으로써 모형의 금강수질모의 정도를 검토하였으며, 갑천과 미호천이 금강본류의 수질에 큰 영향을 끼친다는 점을 감안하여 각기 다른 NH<sub>3</sub>-N과 PO<sub>4</sub>-P의 오염부하량이 갑천과 미호천으로부터 금강본류로 유입된다는 가정하에 대청댐하류 금강본류의 chlorophyll-a 변화를 모의 분석하였다.

## 2. 연구 대상수역

본 연구의 대상수역은 금강 본류를 중심으로 선정되어 한국수자원공사에서 관리하는 대덕용수, 금강용수를 포함하도록 하였으며, 조식의 영향이 적으며 유량측정이 가능한 수위표 지점과 정기적으로 수질측정이 실시되는 수질측정망을 포함하고 있는 대청댐 하류부 지점 즉 금강 본류 대청댐 하류 조정지부터 강경수위표 구간을 선정하였다(표 1). 또한, 이 본류 구간내의 지류 중 갑천, 미호천, 유구천, 지천, 금천, 석성천 그리고

표 1. 금강 대청조정지점부터 강경지점까지의 유하거리

관측지점	대청댐으로부터의 거리 (km)	비 고
대청교	0.00	본 류
갑 천	5.14	지 류
부 강	17.97	본 류
미호천	21.42	지 류
금 남	28.47	본 류
공 주	45.63	본 류
유구천	50.20	지 류
지 천	72.90	지 류
부 여	78.40	본 류
금 천	81.02	본 류
반조원	91.42	본 류
석성천	92.33	지 류
논산천	96.80	지 류
강 경	97.55	본 류

논산천의 7개 지류유입 및 비교적 취수량이 큰 대덕용수, 금강용수의 취수량을 고려하여 물수지를 계산하였다.

### 3. 자료수집 및 분석

본 연구에서는 다양한 오염원에 노출된 하천에서 오염물질이 부하되는 양상을 파악하기 위해 갈수기에 대청조지댐부터 강경수위표지점까지 각종 수질을 측정하여 분석하였고 특히 N, P 및 chlorophyll-a를 중심으로 금강의 수질오염 실태를 파악하였다.

#### 3.1 자료수집

본 연구에서는 금강유역 전반에 걸친 수문 및 수질 현황을 조사 파악하고, 주요 지천을 포함한 금강 본류를 중심으로 수문학적, 수리학적 자료를 수집·분석하여 연구수행의 자료로 사용하였다(한국수자원공사, 1998). 또한 '98년 1회(12월) 그리고 '99년 2회(1월, 3월)에 걸친 수질 및 유량측정을 통하여 대청댐하류의 월별 수질을 조사·분석하였다. 조사·분석된 자료를 바탕으로 일반수질항목에 대하여 하천수질모형을 이용하여 수질모의를 수행하였다.

금강에서 수질환경을 조사한 지점의 선정은 대청조지댐으로부터 강경에 위치한 황산대교까지 유하거리

와 유입지천의 유무 등을 고려하여 택하였으며, 구체적인 선정조건으로는 유량관측지점이 정비되어 있고, 하천수의 흐름상태와 수질이 급변하지 않으며, 조사구간 상하류단의 측정지점에서 하천흐름의 황방향 수질이 일정한 지점을 선정하였다(그림 1). 본류로는 대청댐 부근의 대청교, 갑천 유입 직후의 부강, 미호천 합류 후의 금남교, 공주교, 백제교, 반조원 및 황산대교 등 7개 지점, 그리고 지류로는 갑천, 미호천, 유구천, 지천, 금천, 석성천, 논산천 등 7개 유입지점으로 총 14개 지점으로 하였다.

#### 3.2 시료분석 및 결과

분석시료는 Van Dorn 채수기로 표층에서 채수하였다. 용기는 1 l 플라스틱 병을 사용하였으며 실험실로 냉장운반하여 즉시 분석하여 정량화 하였다. 각종 유기물 분석은 시료를 그대로 사용했으나 무기영양염은 Whatman GF/C로 여과하여 분석하였다. 수질은 표준분석법(Rump와 Krist, 1988; APHA, 1992)에 따라 분석하였다. 수온과 DO는 DO meter (YSI 58 또는 59)로 측정하였다. BOD<sub>5</sub>는 Winkler azid법 또는 BOD probe (YSI model 5730)로 실험하여 농도를 산출하였다. TN과 TP는 APHA (1992)에 준하여 분석하였고 유기질소는 TN에서 DIN (NH<sub>4</sub>+NO<sub>3</sub>)의

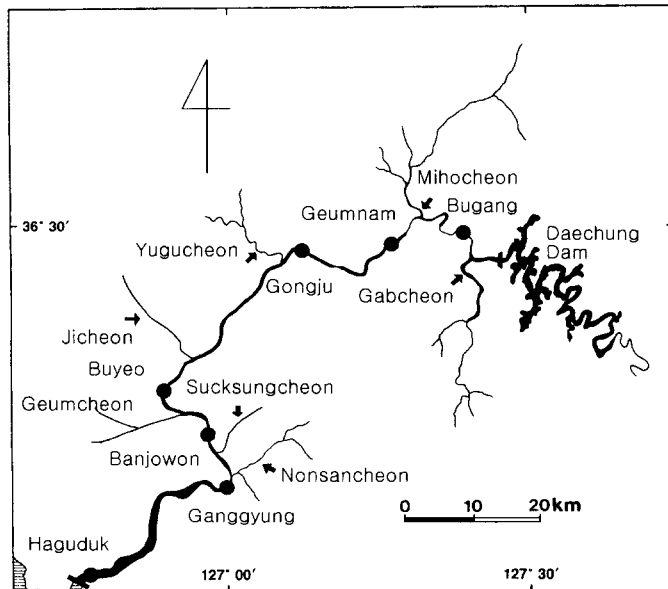


그림 1. 금강 대청댐하류지역의 수질관측지점

표 2. 14 수질관측지점에서의 수질변수의 평균값 (1998년 12월; 1999년 1월, 3월)

수질 변수	분 류	지 류
Water Temperature (°C)	6.9	6.3
Dissolved Oxygen, DO (mgO <sub>2</sub> /l)	13.6	12.5
Chlorophyll-a, (μ g/l)	39.3	16.9
Organic Nitrogen, ON (mgN/l)	2.0	2.7
Ammonia Nitrogen, NH <sub>3</sub> -N (mg N/l)	1.4	2.2
Nitrate Nitrogen, NO <sub>3</sub> -N (mgN/l)	1.0	1.0
Organic Phosphorus, OP (μ g/l)	89.3	139.3
Inorganic Phosphorus, PO <sub>4</sub> -P (μ g/l)	66.9	179.3
Biochemical Oxygen Demand, BOD <sub>5</sub> (mgO <sub>2</sub> /l)	3.8	5.3

차이로 산출하였다. PO<sub>4</sub>-P는 ascorbic acid 환원법으로 분석하였고 유기인 농도는 TP에서 SRP(soluble reactive phosphorus) 농도를 뺀 값으로 보았다. Chlorophyll-a 농도는 90% 에탄올을 추출용매로 사용하여 비등 추출한 후 분광광도계로 665 nm 와 750 nm 에서 흡광도를 측정하여 정량화 하였다(Nusch, 1980). 표 2는 14곳의 수질관측지점에서 3회에 걸쳐서 관측되었던 수질변수들의 평균값을 보여준다.

조사기간동안 수온은 본류와 지류 평균값이 각각 6.9°C와 6.3°C이었고, DO 농도는 13.6 mgO<sub>2</sub>/l, 12.5 mgO<sub>2</sub>/l로 본류가 1.1 mgO<sub>2</sub>/l 정도 높았고 DO는 대부분 과포화였으며 갑천, 미호천, 석성천 및 논산천이 본류나 다른 지류에 비해 낮은 DO농도를 보였다. BOD<sub>5</sub> 평균값은 본류와 지류에서 각각 3.8 mgO<sub>2</sub>/l, 5.3 mgO<sub>2</sub>/l로 지류가 본류보다 1.4배 높았다. 유입지천의 BOD<sub>5</sub> 농도가 높은 것은 도시 땀 공단으로부터 본류로 각종 생활오수 및 공장폐수가 유입되어 생물학적으로 분해되기 어려운 유기물이 상대적으로 많거나 BOD<sub>5</sub>로 분해되지 않는 질소유기물 유입이 매우 큰 것으로 추정되었다(Shin과 Cho, 1999).

유기질소, NH<sub>3</sub>-N, 및 NO<sub>3</sub>-N 평균 농도는 본류와 지류에서 각각 2.0, 1.4, 1.0 mgN/l 그리고 2.7, 2.2, 1.0 mgN/l로서 유기질소는 지류가 본류보다 1.4배, NH<sub>3</sub>-N은 1.6배 높았으나 질산은 거의 비슷한 수준이었다. 금강 본류의 경우 총질소 중에서 상류에서 하류로 갈수록 유기질소 비율이 증가하는 반면 NH<sub>3</sub>-N은 감소하였으며, NO<sub>3</sub>-N 증감의 경향성은 뚜렷하지 않았다.

유기인과 PO<sub>4</sub>-P는 본류와 지류의 평균 농도가 각각 89.3, 139.3 μgP/l 와 66.9, 179.3 μgP/l 이었다.

본류와 지류의 정점별 조사 결과에서 TP와 PO<sub>4</sub>-P는 갑천과 미호천 합류 후부터 크게 증가하여 하류로 내려가면서 감소하는 경향이 뚜렷하였고, 수질오염이 증가할수록 TP 농도가 증가할 뿐 아니라 무기인산의 유입량이 급증함을 보여주었다. 이는 도시생활 하수에 포함된 분해가 빠른 다량의 유기물과 세제의 영향으로 판단된다.

식물플랑크톤의 현존량인 chlorophyll-a 농도는 본류와 지류의 평균농도가 각각 39.3, 16.9 μg/l 이었다. chlorophyll-a 농도는 갑천과 미호천이 유입된 직후부터 하류로 갈수록 급증하였으며 부여와 강경구간에서 chlorophyll-a 농도가 가장 높았고 갑천과 미호천의 chlorophyll-a 농도는 본류보다 낮아 유입되는 영양염류가 하류지역의 식물플랑크톤의 성장을 촉진하는 한 원인이 되고 있음을 시사하였다(Shin, 1998).

## 4. 수질모형의 보정 및 검증

### 4.1 사용 모형

#### 4.1.1 HEC-2모형과 WASP5모형의 연계

한국수자원공사(1996)에서는 기존의 여러 수리해석 모형 중에서 수리학적 모의 결과가 수리특성 구현에 가장 보편적이고 적합하다고 판단되는 HEC 2모형과 수질모형 중에서 동적모의가 가능한 WASP5 모형(EUTRO5)을 수정하여 두 모형이 하나로 실행될 수 있도록 연계하여 낙동강 수역에 대하여 수질모의를 한 바 있다. 수정된 수질모형은 먼저 HEC-2모형(U.S Army Corps of Engineer, 1982)이 실행되고 여기에서 얻어진 수리학적 계산결과(단면적, 유속, 유량, 수심, 수체체적)가 자동적으로 저장되어, EUTRO5모형

이 실행될 때, HEC-2모형의 실행결과에서 저장된 file 을 읽어 EURO5모형에서 필요한 수리자료로 이용하고 이 자료를 기본으로 하여 수질모형을 수행하게 되는데, 이러한 일련의 작업들이 하나의 프로그램에서 동시에 실행될 수 있도록 하였다. 본 연구에서는 낙동강 수역에서 적용되어진 연계모형을 이용하여 금강수역에 수질모의를 수행하기 위하여 HEC-2모형과 EUTRO5모형의 입력자료를 재조정하여 두 모형을 연계 운영하였다. 본 연구의 수질모의에 적용되어진 HEC-2 모형은 대청조정지점으로부터 강경수위표지점까지 약 97.6 km 구간에 대해서 총 207개의 구간으로 구성되어 있으며, WASP5모형은 101개의 구역(segment)으로 구성되어 있다. 따라서 HEC-2모형에서 얻어진 각 구간별 단면적, 유속, 유량, 수심 등과 같은 수리학적 계산결과가 EUTRO5모형에서 각 구역별로 수질항목의 농도계산 및 하류구역으로의 오염물질의 이송·확산을 모의하는 수리자료로 이용된다.

#### 4.1.2 HEC-2 및 EUTRO5모형의 특성

HEC-2는 표준축차법에 의한 1차원 에너지방정식의 해석에 의해 부동류 해석을 실시하게 되며, 표준축차법에 의한 1차원 에너지 방정식은 다음과 같다.

$$WS_2 + a_2 \frac{V_2^2}{2g} = WS_1 + a_1 \frac{V_1^2}{2g} + h_e \quad (1)$$

$$h_e = L\overline{S}_f + C \left| a_2 \frac{V_2^2}{2g} - a_1 \frac{V_1^2}{2g} \right| \quad (2)$$

여기서,  $WS_2$ ,  $WS_1$ 은 각각 상하류부의 수위,  $a_2$ ,  $a_1$ 은 상하류부의 에너지보정계수,  $V_2$ ,  $V_1$ 은 상하류부의 평균유속,  $g$ 는 중력가속도,  $h_e$ 는 에너지 손실,  $L$ 은 하도길이,  $S_f$ 는 마찰경사,  $C$ 는 하도단면의 확대 또는 수축에 따른 손실계수이다.

EUTRO5 모형은 6종류의 복잡도에 따라 수질을 모의 할 수 있는데, 복잡도 4이상에서는 최대 8개 수질항목(DO, BOD, phytoplankton,  $NH_3$ -N,  $NO_3$ -N, Organic-N,  $PO_4$ -P, Organic-P)의 모의가 가능하고, 복잡도 5에서는 비선형 효과 및 탈질소화 과정이 포함되며, 복잡도 6에서는 수질항목과 수저생물군의 상호작용까지 다룰 수 있다. 이 모형에서는 호수, 강, 하구 등을 포함한 여러 가지 수체에 대해 수체의 흐름방향에 대한 1차원 이동 및 일반 또는 독성물질의

거동과 상호반응에 대하여 정상상태 혹은 동적상태의 모의가 가능하다.

EUTRO5 모형의 기본식은 연속성과 물질수지 법칙에 근거하며 다음 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = - \frac{\partial(U_x A_x C)}{A_x \partial x} + \frac{\partial(E_x A_x \frac{\partial C}{\partial x})}{A_x \partial x} + S_L + S_B + S_K \quad (3)$$

여기서,  $C$ 는 수질항목의 농도(mg/l),  $t$ 는 시간(day),  $U_x$ 는 종방향의 유속(m/day),  $A_x$ 는 통수단면적( $m^2$ ),  $E_x$ 는 종방향의 확산계수( $m^2/day$ ),  $S_L$ 은 외부로부터의 오염부하율( $mg/m^3/day$ ),  $S_D$ 는 경계면으로부터의 오염부하율( $mg/m^3/day$ ),  $S_K$ 는 수체내부의 동력학적 반응에 의한 총변화율( $mg/m^3/day$ )이다.

#### 4.2 입력자료

본 모형의 입력자료로는 전반적인 모형의 입출력을 제어하는 모형의 입출력 선택사항과 하천단면의 수리학적 특성에 따라 결정되는 구획의 구분자료 그리고 각 구획의 확산계수 입력자료를 포함한다. 수리특성을 결정하는 중요한 입력자료로서 물수지분석에 기초한 연구구간의 유량자료, 수체체적, 유속, 평균수심자료는 본래의 WASP5모형 수질모의를 하는 경우에 요구되는 사항이나, 본 연구에서 적용하고 있는 수정된 WASP5모형에서는 HEC-2 모형을 이용하여 유량과 하천단면자료, 조도계수 및 하류부의 초기수심 등을 입력하여 운영함으로써 수질모형의 운영에 필요한 수리특성자료를 자동입력 모의하도록 하였다. 하천단면 및 조도계수자료는 1988년에 금강수계 종합정비 기본계획(건설부, 1988)에 기초하여 추진되어온 금강 하천관리를 위한 하상단면 자료를 이용하여 HEC-2 단면의 입력자료로 이용하였다. 하류부의 초기수심은 금강하구둑 지점에서 한계수심을 이용하여 운영하였으며, 본 연구의 하류단인 강경수위표 지점에서는 HEC-2 하류부에 입력된 수심 조건에 관계없이 안정된 수심값을 보여주었다.

표 3은 1999년 1월의 유량자료를 이용하여 계산된 HEC-2모형의 수리학적 계산결과를 보여준다. 구획(segment) 1, 2 그리고 3은 대청댐 조정지로부터 하류 약 2.49 km 구간을 나타내며, 구획 75, 76 그리고 77은 지천유입부부터 하류로 약 2.3 km구간을 나타내며, 구획 99, 100 그리고 101은 강경수위표지점 상류

**표 3. 1999년 1월 유량자료를 이용하여 계산된 HEC-2모형의 수리학적 계산결과**

구획 번호	채적 (m <sup>3</sup> )	유속 (m/sec)	수심 (m)	Channel 단면적 (m <sup>2</sup> )
1	146,656	0.2	1.15	192.80 39.59
2	124,203	0.29	0.70	
3	66,273	0.39	0.77	
.				
.				
75	111,000	0.23	1.52	302.92 226.80
76	276,781	0.17	2.07	
77	215,640	0.31	1.09	
.				
.				
99	1,008,742	0.06	4.71	804.44 828.39
100	415,835	0.08	2.36	
101	1,330,546	0.07	2.85	

약 3.25 km 구간을 나타낸다.

수질이 유량과 밀접한 연관이 있다는 점을 고려할 때 수질모형에서 보다 정확한 유량 자료의 입력은 매우 중요하다. 하지만 정확한 유량자료의 측정은 수질자료와 비교하여 용이하지 않아 수질모의를 위하여 가장 까다로운 입력자료 중에 하나이다. 본 모형에서 지류 유입량 및 분류 유출량은 정상류상태의 흐름으로 고려되었으며 HEC-2 모형의 입력자료로 사용하기 위하여 1999년 1월과 3월 2회에 걸쳐 분류 및 지류 14곳의 수질관측지점에서 유량을 수질과 동시에 실측하였으며 1998년 12월의 유량자료를 얻기 위하여 1999년 1월과

3월에 측정된 유량자료와 그 당시의 수위자료를 이용하였다. 표 4는 대청댐하류 구간별 물수지를 고려한 유량자료를 보여준다. 각 주요지점에서의 유량자료는 매회에 걸쳐서 실측된 지류유입량 및 취수장에서의 취수량자료를 이용하여 상류로부터 하류로 가감하여 분석하였다.

수질모형의 각 경계조건 (상류단 유입부, 하류단 유출부, 지류유입부)으로 유입되는 오염부하량을 입력시키기 위하여 각기 다른 수질변수에 대하여 시간에 따라 일정한 오염농도를 입력하였으며, 각 지류로부터 유입되는 유량자료 역시 시간에 따라 일정한 값을 입력하여 모형을 운영하였다. 또한 본 연구에서는 WASP5 모형의 복잡도 5에 해당하는 부영양화의 기작과 밀접하게 연관되어 있는 반응계수들을 입력하였다. 모형에 적용되어진 반응계수는 표 5와 같다.

### 4.3 수질모형의 보정 및 검증

#### 4.3.1 수질모형의 보정

하천수질모의를 위한 모형을 적용하기 위해서는 우선 모형의 매개변수를 적용대상구간에 적합하게 보정하는 것이 필요하다. 따라서 수질모의 모형에 적용되어진 반응계수값의 보정을 위하여 1999년 1월에 분류 및 지류에 위치한 14개 관측지점에서 측정되어진 수질 및 유량자료를 이용하였으며, 주요 수질자료로는 DO, BOD, ON, NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, OP, PO<sub>4</sub>-P 그리고 chlorophyll-a 등이 있다 (표 6). 반응계수는 수질인자 상호간의 역학적인 반응을 규명하여 값으로 나타낸 것으로 EUTRO5모형에서 수질모의 항목들의 상호반

**표 4. 대청댐하류 구간별 물수지를 고려한 유량자료 (1998년 12월; 1999년 1월, 3월)**

구 간	유 량 (CMS)			지류 또는 정수장 (취수장)	유 량 (CMS)		
	12월	1월	3월		12월	1월	3월
조정지댐 ~ 대덕용수	49.90	37.50	25.0	대덕용수	-0.30	-0.30	-0.30
대덕용수 ~ 갑천 합류부	49.60	37.20	24.70	갑 천	11.111	8.091	7.146
갑천 합류부 ~ 미호천 합류부	60.711	45.29	31.84	미호천	9.067	9.178	7.465
미호천 합류부 ~ 유구천 합류부	69.778	54.47	39.31	유구천	1.136	1.221	0.996
유구천 합류부 ~ 지천 합류부	70.914	55.69	40.31	지 천	0.896	0.875	2.249
지천 합류부 ~ 금강용수	71.810	56.56	42.56	금강용수	-3.0	-3.0	-3.0
금강용수 ~ 금천 합류부	68.810	53.56	39.56	금 천	1.018	1.325	0.802
금천합류부 ~ 석성천 합류부	69.828	54.89	40.36	석성천	0.589	0.613	0.529
석성천합류부 ~ 논산천 합류부	70.417	55.50	40.89	논산천	1.885	2.071	1.70
논산천 합류부 ~ 강경	72.302	57.57	42.59				

표 5. EUTRO5에 적용된 반응계수들

반응계수	비 고	기준 설정값	적용된 값
K12C	Nitrification rate	0.09 day <sup>-1</sup>	0.01 ~ 0.05 day <sup>-1</sup>
K12T	Temperature coefficient	1.08	*
KNIT	Half saturation constant	2.0 mgO <sub>2</sub> /L	*
K20C	Denitrification rate at 20 °C	0.09 day <sup>-1</sup>	*
K20T	Temperature coefficient	1.045 mgO <sub>2</sub> /L	*
KNO <sub>3</sub>	Half saturation constant for denitrification oxygen limitation	0.1 mgO <sub>2</sub> /L	*
KIC	Saturated growth rate of phytoplankton	2.0 day <sup>-1</sup>	3 ~ 10 day <sup>-1</sup>
KIT	Temperature coefficient	1.068	*
LGHTS	Light formulation switch	=1, use Di Toro et al. =2, use Dick Smith's	= 1, use Di Toro et al
CCHL	Carbon-to-chlorophyll ratio	30mg carbon/mg chl a	*
IS1	Saturation light intensity for Phytoplankton	300 Ly/day	*
KMNG1	Nitrogen half-saturation constant	0.025 mg N/L	*
KMPG1	Phosphorus half-saturation constant	0.001 mg PO <sub>4</sub> -P/L	*
KIRC	Endogenous respiration rate of phytoplankton	0.125 day <sup>-1</sup>	*
KIRT	Temperature coefficient for phytoplankton respiration	1.045	*
KID	Non-predatory phytoplankton death rate	0.02 day <sup>-1</sup>	*
KIG	Grazing rate on phytoplankton per unit zooplankton population	0.0 L/mgC-day	*
NUTLIM	Nutrient limitation option	0 = minimum 1 = multiplicative	0 = minimum
PCRB	Phosphorous-to-carbon ratio in phytoplankton	0.025 Mg PO <sub>4</sub> -P/mg C	0.037 Mg PO <sub>4</sub> -P/mg C
NCRB	Nitrogen-to-carbon ratio in phytoplankton	0.25 Mg N/mg C	0.30 Mg N/mg C
KMPHYT	Half-saturation constant for phytoplankton	0.00 mg carbon/L	*
KDC	CBOD deoxygenation rate	0.16~0.21 day <sup>-1</sup>	0.05 day <sup>-1</sup>
KDT	Temperature coefficient for carbonaceous deoxygenation rate	1.047	*
KBOD	Half-saturation constant for carbonaceous deoxygenation oxygen limitation	0.5 mg O <sub>2</sub> /L	*
OCRB	Oxygen to carbon ratio in phytoplankton	2.667 mg O <sub>2</sub> /mg C	*
K2	Reaeration rate constant at 20 °C for entire water body		f(water velocity, water depth)
K71C	Mineralization rate of dissolved organic nitrogen	0.075 day <sup>-1</sup>	*
K71T	Temperature coefficient for K71C	1.08	*
FON	Fraction of dead and respired phytoplankton nitrogen recycled to organic nitrogen	1.0	*
K83C	Mineralization rate of dissolved organic phosphorus	0.22 day <sup>-1</sup>	0.15 day <sup>-1</sup>
K83T	Temperature coefficient for K83C	1.08	*
FOP	Fraction of dead and respired phytoplankton phosphorus recycled to organic phosphorus	1.0	*

\* : 기준설정 값 사용

에 관여하는 반응계수는 전체수질항목에 대하여 42개가 있다.

42개의 변수중 모형에 의한 계산결과에 미치는 영향을 파악하여 추정대상 반응계수를 결정하기 위하여 민감도분석을 실시하였다. 민감도분석을 위하여 1999년

1월 유량 및 수질자료를 사용하여 금천합류점으로부터 약 2.8 km 하류지점에서의 모의치를 기준으로 -100%부터 +100%까지 변화를 주어 반응계수의 변화치가 모의치에 미치는 영향을 분석하였다. 민감도분석결과에 의하면 질산화율, 조류의 포화성장율, 조류의 인과 탄

소의 비, 조류의 질소와 탄소의 비, 생화학적산소요구량의 탈산소율, 그리고 유기인의 가수분해율 등에 대한 변화가 모의치에 민감한 영향을 주는 것으로 나타났다.

보정을 통해 얻은 대청댐 조정지 하류에서 강경지점까지의 질산화율은 대략 0.01~0.05/day, 조류의 포화성장율은 3~10/day, 조류의 인과 탄소의 비는 0.037

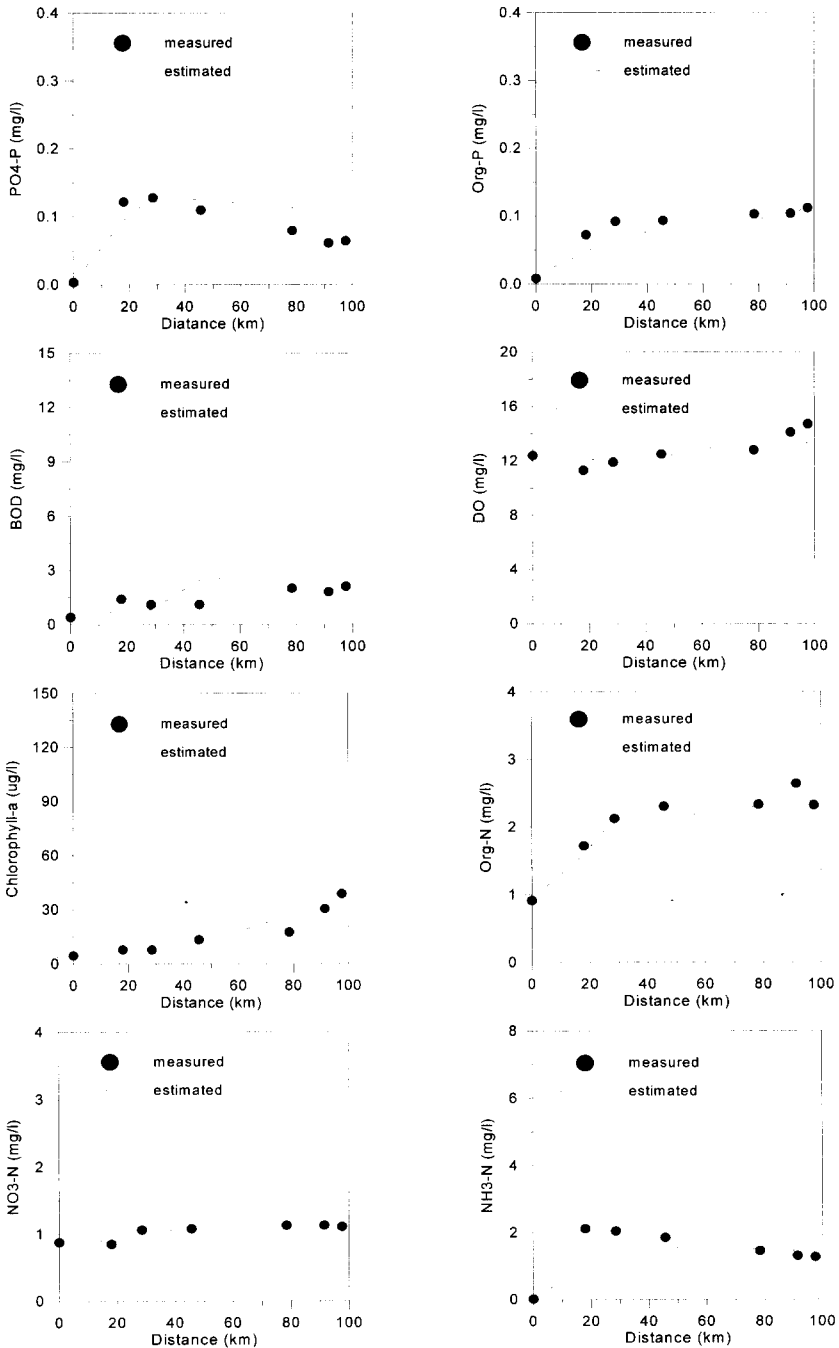


그림 2. 금강 대청댐하류 구간에서 관측된 수질값과 산정된 수질값의 비교 (1999년 1월)



mg PO<sub>4</sub>-P/mg C, 조류의 질소와 탄소의 비는 0.30 mg N/mg C, 생화학적산소요구량의 탈산소율은 0.05/day, 그리고 유기인의 가수분해율은 0.15/day 정도이었으며, 대체적으로 이 값들은 WASP5 모형의 매뉴얼에 제시된 반응계수 범위 내에 속한 것으로 나타났다. 하지만 조류의 포화상장률은 기존의 모형에서 적용되고 있는 반응계수값과 비교하여 상당히 큰 수치를 적용하였는데 이는 부영양 내지는 과영양화된 수역에서 대발생하는 식물플랑크톤의 생리적 특성을 모형에서 제대로 반영하지 못한 결과인 것으로 판단된다. 기존의 반응계수값은 실험실 결과가 대부분인지라 많은 부분이 제한적이라서 자연 생태계에서 일어나는 조건과는 상이한 부분이 많은 것으로 판단된다.

그림 2는 1999년 1월에 관측된 수질변수값과 보정된 반응계수를 이용하여 산정된 수질변수값이 대청조 정지댐으로부터 강경수위표지점까지 금강분류를 따라

변화되는 양상을 보여주고 있으며 반응계수값들이 적절하게 보정되었다고 판단되었다. 또한 수질모형의 보정결과에 대한 정상적 평가를 위하여 t-test를 실시하였으며 결과는 표 6과 같다. t-test 결과 7개 수질관측지점에서의 8개의 수질변수들의 관측치와 산정치의 평균값이 모두 유의수준 0.1에서 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않고 있다.

### 4.3.2 수질모형의 검증

일단 모형의 매개변수 값이 결정되어진 후에는 모형의 결과치가 적당한 수질 값을 모의할 수 있는지를 평가하는 작업이 필요하다. 이 연구에서 비교하고자 하는 모의 결과치는 대청댐으로부터 금강하류구간까지 본류에 위치한 7곳의 수질관측지점에서 1998년 12월과 1999년 3월에 관측된 PO<sub>4</sub>-P, BOD, DO 등 8가지의 서로 다른 수질변수값을 비교하였다(그림 3).

표 6. 수질모형 보정결과에 대한 t-test를 이용한 신뢰도 검증 (1999년 1월)

통 계 치		DO (mg/l)	BOD (mg/l)	Org-N (mg/l)	NH <sub>3</sub> -N (mg/l)	NO <sub>3</sub> -N (mg/l)	Org-P (mg/l)	PO <sub>4</sub> -P (mg/l)	Chlorophyll-a (μg/l)
평균값	관측치	12.814	1.414	2.053	1.294	1.034	0.0834	0.0811	17.171
	산정치	12.714	1.891	1.977	1.216	0.948	0.0744	0.0954	18.314
T-value		0.20	0.92	0.25	0.24	1.82	0.48	-0.62	-0.15
유의도 (양측검증)		0.848	0.377	0.377	0.817	0.094	0.637	0.544	0.879
자 유 도		6	6	6	6	6	6	6	6

표 7. 수질모형의 검증결과에 대한 t-test를 이용한 신뢰도 검증

(a) 1998년 12월

통 계 치		DO (mg/l)	BOD (mg/l)	Org-N (mg/l)	NH <sub>3</sub> -N (mg/l)	NO <sub>3</sub> -N (mg/l)	Org-P (mg/l)	PO <sub>4</sub> -P (mg/l)	Chlorophyll-a (μg/l)
평균값	관측치	10.971	4.114	1.841	0.999	1.104	0.0569	0.0586	8.271
	산정치	12.114	1.876	1.755	0.959	1.026	0.0642	0.0589	15.101
T-value		-2.01	4.35	0.26	0.17	2.98	-0.60	-0.02	-1.39
유의도 (양측검증)		0.068	0.001	0.796	0.871	0.012	0.561	0.983	0.189
자 유 도		6	6	6	6	6	6	6	6

(b) 1999년 3월

통 계 치		DO (mg/l)	BOD (mg/l)	Org-N (mg/l)	NH <sub>3</sub> -N (mg/l)	NO <sub>3</sub> -N (mg/l)	Org-P (mg/l)	PO <sub>4</sub> -P (mg/l)	Chlorophyll-a (μg/l)
평균값	관측치	14.70	4.728	1.548	2.310	0.676	0.1066	0.0991	59.0
	산정치	13.142	2.671	1.372	1.282	0.529	0.1127	0.0691	35.768
T-value		1.57	1.69	0.44	1.94	1.73	-0.22	0.89	0.99
유의도 (양측검증)		0.143	0.117	0.670	0.076	0.109	0.828	0.391	0.342
자 유 도		6	6	6	6	6	6	6	6

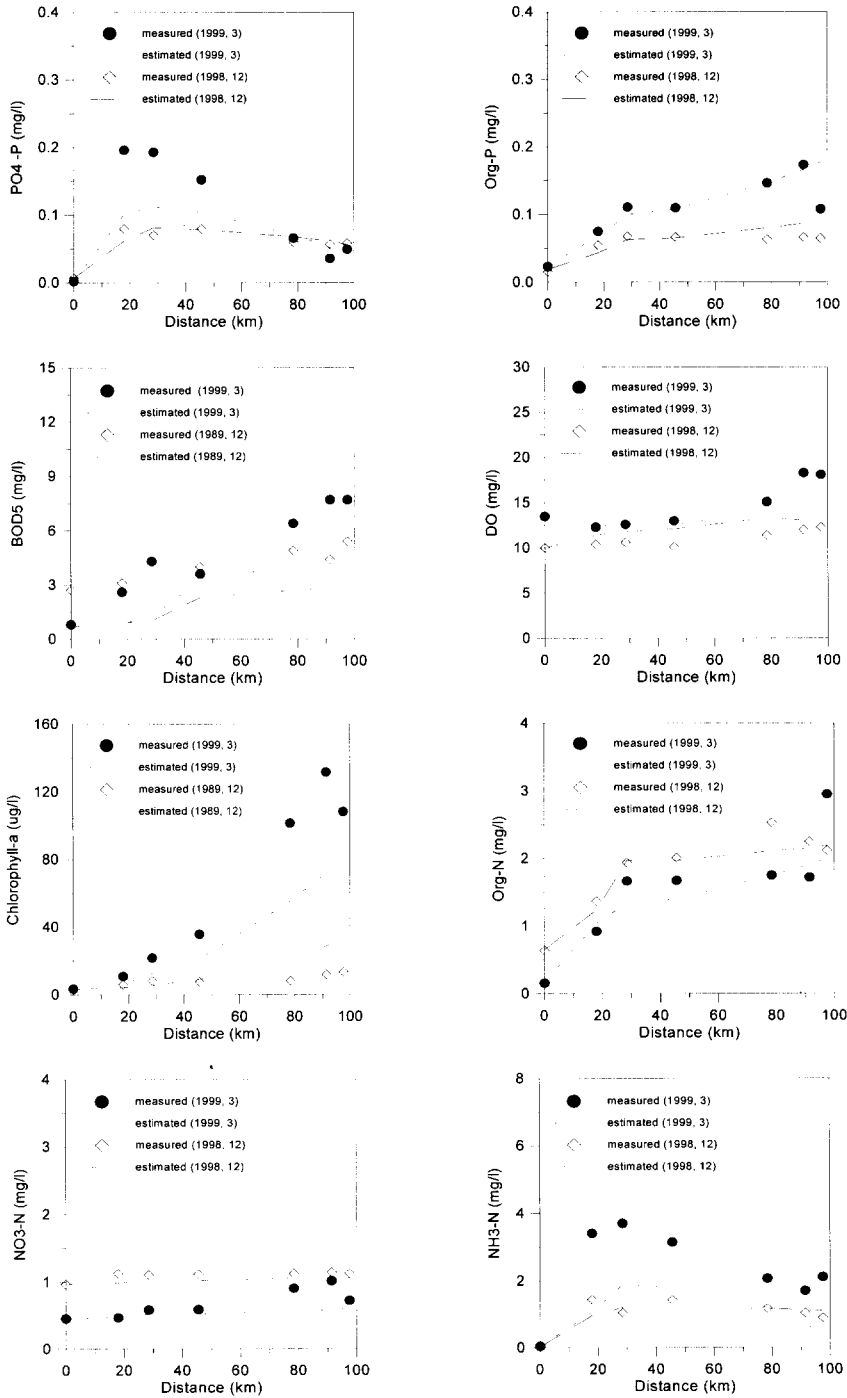


그림 3. 금강 대청댐하류 구간에서 관측된 수질값과 산정된 수질값의 비교 (1998년 12월; 1999년 3월)

그림 3에서 보여주는 바와 같이 1998년 12월과 1999년 3월에 관측되어진 수질자료를 모의되어진 수질 변수값과 도표를 이용하여 비교 검토한 결과 유기인, 용존산소, 유기질소 그리고 질산성질소 등은 PO<sub>4</sub>-P, 생화학적산소요구량, chlorophyll-a농도 그리고 암모니아성질소 등과 비교하여 일치함을 보여주었다. 1998년 12월 자료와 1999년 3월 자료를 이용한 모형의 검

증결과에 있어서 약간의 차이를 보이고 있는데 이는 특정 정점 이후 영양염의 결핍과 유량의 차이가 잘 반영되지 못한 것으로 사료된다.

또한 수질모형의 검증결과에 대한 정량적 평가를 위하여 t-test를 실시하였으며 결과는 표 7과 같다. 1998년 12월의 수질자료를 이용하여 모의된 수질결과 의 평균치와 관측된 수질자료의 평균치 사이에 차이를 t-test로 검증한 결과 7개 수질관측지점에서의 8개의 수질변수들의 관측치와 산정치의 평균값이 모두 유의수준 0.01에서 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않고 있으나, 유의수준 0.05에서 생화학적산소요구량과 질산성질소의 평균값이 유의한 차이를 보이고 있었다. 또한 1999년 3월의 수질자료를 이용한 t-test 결과에서는 7개 수질관측지점에서의 8개의 수질변수들의 관측치와 산정치의 평균값이 모두 유의수준 0.1에서 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않고 있다.

표 8. 수질모의를 위한 갑천과 미호천으로부터 PO<sub>4</sub>-P와 NH<sub>3</sub>-N 오염부하량 변동치

대안	PO <sub>4</sub> -P (갑천)	PO <sub>4</sub> -P (미호천)	NH <sub>3</sub> -N (갑천)	NH <sub>3</sub> -N (미호천)
1	+70 %	-	-	-
2	-70 %	-	-	-
3	-	+70 %	-	-
4	-	-70 %	-	-
5	-	-	+70 %	-
6	-	-	-70 %	-
7	-	-	-	+70 %
8	-	-	-	-70 %
9	+70 %	-	+70 %	-
10	-	+70 %	-	+70 %
11	-70 %	-	-70 %	-
12	-	-70 %	-	-70 %
13	+70 %	+70 %	+70 %	+70 %
14	-70 %	-70 %	-70 %	-70 %

### 5. 수질모형을 이용한 수질모의

대청댐하류 금강분류의 부영양화 문제와 관련하여 갑천과 미호천의 영향을 파악하기 위하여 1999년 1월 자료를 이용하여 다음의 14가지 대안을 선정하여 수질 모의모형에 적용하여 수질변화를 모의하였다 (표 8). 갑천과 미호천은 대청댐 하류 금강분류의 수질악화의 주요원인인 것으로 사료되며, 수질모의를 위해서 갑천과 미호천으로부터 각기 다른 NH<sub>3</sub>-N과 PO<sub>4</sub>-P의 오

표 9. 갑천과 미호천에서 유입되는 NH<sub>3</sub>-N과 PO<sub>4</sub>-P 농도의 변화에 따른 대청댐하류구간에서 chlorophyll-a 변화

대안	관측지점	chlorophyll-a 농도 (µg/l)						
		대청교	부 강	금남교	공 주	부 여	반조원	강 경
기준 농도치		4.58	6.11	6.41	10.80	26.90	34.30	39.10
1		4.58	6.11	6.41	10.80	26.90	34.30	39.10
2		4.58	6.09	6.39	10.70	26.60	33.90	38.60
3		4.58	6.11	6.41	10.80	26.90	34.30	39.10
4		4.58	6.11	6.41	10.80	26.80	34.20	38.90
5		4.58	6.11	6.42	10.80	26.90	34.40	39.30
6		4.58	6.10	6.41	10.80	26.70	34.10	38.90
7		4.58	6.11	6.41	10.80	26.90	34.40	39.20
8		4.58	6.11	6.41	10.80	26.70	34.10	38.90
9		4.58	6.11	6.42	10.80	27.0	34.40	39.30
10		4.58	6.11	6.41	10.80	26.90	34.40	39.30
11		4.58	6.09	6.39	10.70	26.60	33.90	38.60
12		4.58	6.09	6.39	10.70	26.60	33.90	38.60
13		4.58	6.11	6.42	10.80	27.0	34.50	39.40
14		4.58	6.09	6.39	10.60	25.90	32.70	36.90

염부하량이 금강분류로 유입된다고 가정하였다.

각 대안에 대하여 수질모의한 결과를 즉, 갑천과 미호천의 오염부하량이 금강분류의 수체에 미치는 영향을 표 9에 chlorophyll-a 농도로 나타내었다. 이는 부영양화에 영향을 주는 현존생물체량의 척도로서 chlorophyll-a 농도가 적합하기 때문이다. 각 대안에 대하여 수질 모의한 결과를 chlorophyll-a 농도로 나타내어 분석한 결과에 의하면 갑천과 미호천에서  $\text{NH}_3\text{-N}$ 과  $\text{PO}_4\text{-P}$ 가 70 % 감소되어진 상태에서 금강분류로 유입되는 경우 금강분류 대청교지점부터 강경수위표지점까지 전 구간에 걸쳐 전반적으로 chlorophyll-a 농도의 변화를 보였다.

## 6. 결 론

본 연구의 월별 수질조사결과에 의하면 조사기간동안 DO 농도는 갑천, 미호천, 석성천 및 논산천이 본류나 다른 지류에 비해 낮은 DO 농도를 보였다.  $\text{BOD}_5$ 는 유입지점의 농도가 본류의 농도보다 높았으며, 이는 도시 및 공단으로부터 본류로 각종 생활오수 및 공장폐수가 유입되어 생물학적으로 분해되기 어려운 유기물이 상대적으로 많거나  $\text{BOD}_5$ 로 분해되지 않는 질소유기물 유입이 매우 큰 것으로 추정되었다.

또한 금강 본류의 경우 총질소 중에서 상류에서 하류로 갈수록 유기질소 비율이 증가하는 반면  $\text{NH}_3\text{-N}$ 은 감소하였으며,  $\text{NO}_3\text{-N}$  증감의 경향성은 뚜렷하지 않았다. TP와  $\text{PO}_4\text{-P}$ 는 갑천과 미호천 합류 후부터 크게 증가하여 하류로 내려가면서 감소하는 경향이 뚜렷하였고, 수질오염이 증가할수록 TP 농도가 증가할 뿐 아니라 무기인산의 유입량이 급증함을 보여주었다. 이는 도시생활 하수에 포함된 분해가 빠른 다량의 유기물과 세제의 영향으로 판단된다.

식물플랑크톤의 현존량인 chlorophyll-a 농도는 갑천과 미호천이 유입된 직후부터 하류로 갈수록 급증하였으며 부여와 강경구간에서 chlorophyll-a 농도가 가장 높았고 갑천과 미호천의 chlorophyll-a 농도는 본류보다 낮아 유입되는 영양염류가 하류지역의 식물플랑크톤의 성장을 촉진하는 한 원인이 되고 있음을 시사하였다.

대청조정지댐하류부터 강경수위표지점까지 월별 수질모의를 위하여 1999년 1월에 관측된 수질자료를 이용하여 반응계수를 보정하였으며 관측된 수질변수값과 산정된 수질변수값을 비교한 결과 반응계수값들이 적절하게 보정되었다고 판단되었다. 따라서 이를 검증하

기 위하여 1998년 12월과 1999년 3월에 관측되어진 수질자료를 모의되어진 수질변수값과 도표를 이용하여 비교 검토한 결과 유기인, 용존산소, 유기질소 그리고 질산성질소 등은 무기인, 생화학적산소요구량, chlorophyll-a 농도 그리고 암모니아성 질소 등과 비교하여 일치함을 보여주었다. 또한 1998년 12월의 수질자료를 이용하여 모의된 수질결과의 평균치와 관측된 수질자료의 평균치 사이에 차이를 t-test로 검증한 결과 7개 수질관측지점에서의 8개의 수질변수들의 관측치와 산정치의 평균값이 모두 유의수준 0.01에서 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않고 있으나, 유의수준 0.05에서 생화학적산소요구량과 질산성질소의 평균값이 유의한 차이를 보이고 있었다. 1999년 3월의 t-test 결과에서는 7개 수질관측지점에서의 8개의 수질변수들의 관측치와 산정치의 평균값이 모두 유의수준 0.1에서 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않고 있다.

대청댐하류 금강분류의 부영양화 문제와 관련하여 갑천과 미호천의 영향을 파악하기 위하여 갑천과 미호천으로부터 각기 다른  $\text{NH}_3\text{-N}$ 과  $\text{PO}_4\text{-P}$ 의 오염부하량이 금강분류로 유입되어진다고 가정하고, 각 대안에 대하여 수질 모의한 결과를 chlorophyll-a 농도로 나타내어 분석한 결과에 의하면 갑천과 미호천에서  $\text{NH}_3\text{-N}$ 과  $\text{PO}_4\text{-P}$ 가 70% 감소되어진 상태에서 유입되어지는 경우를 제외하고는 나머지 대안들은 거의 미미한 chlorophyll-a 증감효과를 보였다.

## 참 고 문 헌

- 건설부 (1988). 금강수계 종합정비계획 보고서.
- 건설부 (1988). 금강수계 종합정비계획 (I), (II).
- 유선재, 김종구, 권태연, 이석모 (1999). “금강의 부영양화 현상에 관한 연구.” 한국환경과학회지, 한국환경과학회, 제8권, 제2호, pp. 155-160.
- 한국수자원공사 (1996). 대하천 오염물질 이송·확산 예측 및 저감대책에 관한 연구보고서, 수자원연구소 WRII-WS-95-3.
- 한국수자원공사 (1998). 대청댐하류 오염물질 이송·확산 예측 및 저감대책에 관한 연구보고서, 수자원연구소 WRII-WR-98-5.
- APHA, AWWA, WEF (1992). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 18th ed. American Public Health Association, Washington D.C.
- Harper, D. (1993). *Eutrophication of freshwater*

- *Principles, problems and restoration*. Chapman & Hall, pp. 1-28.
- Nusch, E.A. (1980). "Comparison of different methods for chlorophyll and phaeopigment determination." *Arch. hydrobiol. Beih. (Ergebn. Limnol.)*, Vol. 14, pp. 14-36.
- Rump, H.H., and Krist, H. (1988). *Laboratory manual for the examination of water, wastewater, and soil*. VCH Verlagsgesellschaft Publ., New York, NY.
- Shin, J.K. (1998). *Eutrophication and ecological characteristics of algal population in the freshwater zone of the Nakdong River*. Ph.D. Dissertation, Inje University, Pusan, Korea.
- Shin, J.K., and Cho, K.J. (1999). "Water eutrophication of the Choman River near Kimhae City." *Korean Journal of Limnol.*, Vol. 32, pp. 35-42.
- U.S. Army Corps of Engineers (1982). *HEC-2 Water Surface Profiles: User's Manual*. The Hydrologic Engineering Center, Davis, CA.
- Wetzel, R.G., and Likens, G.E. (1991). *Limnological Analyses*. 2nd ed. Springer Verlag.
- (논문번호:99-050/접수:1999.06.17/심사완료:1999.12.18)