

## 퍼지 Simulation 방법에 의한 주암호의 수질모델링

이용운 · 황윤애 · 이성우\* · 정선용 · 최정욱

전남대학교 환경공학과

\*한국수자원공사

(1999년 9월 22일 접수, 1999년 12월 17일 채택)

## Water Quality Modeling of Juam Lake by Fuzzy Simulation Method

Yong Woon Lee · Yun Ae Hwang · Sung Woo Lee\* · Seon Yong Chung · Jung Wook Choi

*Dept. of Environmental Engineering, Chonnam National University*

*\*Korea Water Resources Corporation*

### ABSTRACT

Juam lake is a major water resource for the industrial and agricultural activities as well as the resident life of Kwangju and Chonnam area. However, the water quality of the lake is getting worse due to a large quantity of pollutant inflowing to the lake. As a preliminary step in making the countermeasure to achieve the water quality goal of the lake, it is necessary to understand how the water quality of the lake will be in future. Several computer programs can be used to predict the water quality of lake. Each of these programs requires a number of input data such as hydrological and meteorological data, and the quantity of the pollutant inflowed, but some or most of the input data contain uncertainty, which eventually results in the uncertainty of prediction value (future level of water quality). Generally, the uncertainty stems from the lack of information available, the randomness of future situation, and the incomplete knowledge of expert. Thus, the purpose of this study is to present a method for representing the degree of the uncertainty contained in input data by applying fuzzy theory and incorporating it directly into the water quality modeling process. By using the method, the prediction on the future water quality level of Juam lake can be made that is more appropriate and realistic than the one made without taking uncertainty in account.

---

Key Words : Water Quality Modeling, WASP5 Model, Pollution Loading Rate, Fuzzy Simulation, Fuzzy Number, Uncertainty

## 요 약 문

주암호는 광주·전남지역의 주민생활이나 공·농업활동에 기반이 되는 중요한 수자원의 역할을 하고 있으나, 주암호에 유입되는 오염물질로 말미암아 호수의 수질은 점점 악화되고 있는 실정이다. 주암호의 수질개선대책을 수립하기 위한 예비단계로서 호수의 수질모델링을 실시하여 수질이 장래에 어떻게 변화될 것인지를 확인할 필요성이 있다. 수질모델링 작업에 이용할 수 있는 컴퓨터 프로그램은 여러 종류가 있으나, 각 프로그램에서 요구하는 오염물질 유입량, 수리·수문 등의 입력자료(Input data)는 불확실성을 포함하고 있으며, 이러한 불확실성은 예측결과(장래수질)의 불확실성을 초래하게 된다. 수질모델링에서 불확실성이 발생하는 주요원인은 활용할 수 있는 정보의 부족, 미래상황 및 예측모델의 불확실, 그리고 전문가 지식의 한계 때문이다. 따라서 본 연구의 목적은 퍼지이론을 응용하여 수질예측 모델에서 요구하는 입력자료들의 불확실성 정도를 해석하고, 이를 수질예측 모델에 그대로 결합시킬 수 있는 방법을 개발하는 것이다. 이러한 방법의 적용은 불확실성을 고려하지 않는 방법들에 비해 합리적이고 현실성 있는 주암호의 장래수질을 예측하는데 도움이 될 것이다.

주제어 : 수질모델링, WASP5 모델, 오염물질 유달율, 퍼지 Simulation, 퍼지숫자, 불확실성

## 1. 서 론

보성강 수계인 전라남도 순천시 주암면 대광리에 위치한 주암호의 물은 광주시를 비롯한 인근도시 및 공단지역의 생활용수와 공업용수로 주로 사용되고 있으며, 농업용수로도 일부분 이용되고 있다. 이와 같이 주암호의 물은 광주·전남 지역의 주민생활이나 공·농업활동에 기반이 되는 중요한 수자원의 역할을 하고 있으나, 유입되는 오염물질로 말미암아 호수의 수질은 점점 악화되고 있는 실정이다.<sup>1)</sup> 특히, 매년 심화되고 있는 호수의 부영양화로 인해 여름마다 조류(藻類)가 과잉번식할 뿐만 아니라 여름철에 연녹색의 조류가 호수표면에 넓게 떠있을 때는 용수사용자인 시민들에게 시각적으로 불쾌감을 주어 상수도에 대한 시민들의 신뢰도를 저하시키고 있다. 따라서 주암호의 수질개선대책은 시급히 마련되어야 할 것이다. 이를 위한 예비단계로서 주암호의 수질모델링 작업은 필요하다.

수질모델링의 근본목적은 호수의 장래수질을 보다 신뢰성 있는 방법으로 예측함으로써 호수의 목표수질 달성 또는 현재의 수질을 유지할 수 있도록 합리적이고 경제적인 수질개선대책을 수립하는데 이용하기 위함이다. 따라서 수질모델링은 호수의 수질개선대책을 수립하기 위한 기본과정의 하나이다. 호

수의 수질은 WASP5(Water quality analysis simulation program)<sup>2)</sup>와 같은 프로그램 등을 이용하여 예측되어 왔으나, 이러한 프로그램에서 요구하는 오염물질 및 수리·수문 항목별 입력자료(Input data)의 불확실성은 예측결과(장래수질)의 불확실성을 낳고 있다. 이러한 불확실성이 발생하는 주요원인은 활용할 수 있는 정보의 부족, 미래상황 및 예측모델의 불확실 또는 전문가 지식의 한계 때문이다.

수질개선대책으로는 보통 하나가 아닌 다수의 대안이 개발되는데, 대안별 수질 예측값의 불확실성이 크면 클수록 최적대안 선정에 관한 의사결정은 점점 더 어려워질 뿐만 아니라 경우에 따라서는 오판을 할 수도 있다. 이러한 오판은 불확실한 값을 무리하게 명확한 값으로 바꾸어 사용함으로써 발생한다. 평균값은 불확실한 값이 마치 명확한 값인 것처럼 표현되는 대표적인 경우이다. 따라서 본 연구의 목적은 주암호 수질개선대책의 대안별 장래수질 예측시에 요구되는 불확실한 입력자료들의 불확실성 정도를 퍼지이론을 응용하여 해석하고, 이를 수질모델링에 그대로 결합시킬 수 있는 방법을 개발하는 것이다. 이러한 방법을 통해 주암호의 장래수질은 합리적이고 현실성 있게 예측될 수 있을 것이다.

## 2. 퍼지 시뮬레이션 방법

### 2.1. 퍼지이론의 개요

퍼지이론(Fuzzy theory)은 1965년 Zadeh가 발표한 "퍼지집합(Fuzzy sets)"이란 논문에서 처음 소개되었다.<sup>3)</sup> 우리가 보편적으로 알고 있는 종래의 집합은 경계가 명확해서 퍼지집합과 구분하여 보통집합(Crisp sets)이라고 부른다. 예를 들어 보통집합으로 "10보다 큰 수의 집합"이 있을 때 이 집합의 경계는 명확하다. 그러나 "10보다 훨씬 큰 수의 집합"이 있을 때 11이라는 수가 이 집합의 원소라고 명확하게 말하기는 어렵다. 즉, 10보다 훨씬 큰 수가 어느 수 이상인지 경계가 명확하지 않기 때문이다. 이와 같이 집합의 경계가 불명확한 것을 퍼지집합이라고 부른다.

어떤 원소  $x$ 가 어느 정도로 퍼지집합  $A$ 에 소속되어 있는지를 표현하는 것이 소속함수(Membership function)  $\mu_A(x)$ 인데, 소속함수 값의 범위는 0과 1 사이이다( $0 \leq \mu_A(x) \leq 1$ ). 이와 같이 퍼지집합의 소속함수를 활용하여 표현한 것을 퍼지숫자(Fuzzy number)라고 부른다.<sup>4)</sup> 즉, 퍼지숫자란 소속함수의 어떤 값을 가지고 어느 집합에 속하는 정도를 표현하는 숫자이다. 원소  $x$ 가 집합  $A$ 에 포함되는 정도가 높을수록 소속함수의 값은 1에 가까워지고, 낮을수록 0에 접근하게 된다. 어떤 퍼지집합이 소속함수의 값으로서 0 또는 1만을 가질 때, 이러한 퍼지집합은 보통집합과 동일한 것이 된다. 보통집합에서는 집합의 경계가 명확하여 어떤 원소가 집합에 소속되면 소속함수의 값은 1(예)이고 그렇지 않으면 0(아니오)이 된다.

### 2.2. 불확실성 해석

WASP5와 같은 수질모델을 이용하여 호수의 장래수질을 예측할 때 유입유량과 오염물질 유달부하량은 모델의 가장 중요한 입력 변수들이라고 할 수 있다. 여기서 유달부하량이란 발생부하량 중에서 배출원의 환경기초시설에 의해 삭감된 양과 유로과정에서 자연정화된 양을 삭제하고 호수에 실제 유입된 양을 말한다. 호수의 장래수질이 최대한 어느 정도

까지 악화될 수 있는지를 파악하기 위하여 보통 유량의 최저치(기준갈수량)와 유달부하량의 최대치를 사용하게 된다. 하지만, 이러한 값들이 매년 반복하여 일어날 수 없음에도 불구하고 장래수질에 대한 simulation은 유입유량과 유달부하량이 매년 동일하게 반복되어진다는 실현 불가능한 가정에 기초하여 수행되고 있다. 그러나, 이러한 가정을 사용한 장래수질 예측치는 호수로 실제 유입되는 유량 및 유달부하량의 크기와 순서가 매년 다르게 나타나기 때문에 신뢰도가 떨어지게 된다. 한편, 호수의 장래 유입유량은 기상상황에 대한 미래의 무작위성(Randomness) 때문에 명확한 값(Nonfuzzy number or point value)으로 산출하기가 곤란하다. 또한, 각 오염원에서 배출된 오염물질이 유로과정에서 자연정화에 의해 얼마나 삭감되는지를 정량적으로 명확하게 산출하기는 어렵다. 이러한 이유 때문에 유입유량과 유달부하량은 불확실성을 내포하게 된다. 따라서, 본 연구에서는 불확실한 유입유량 및 유달부하량 자체를 수질모델링의 입력자료로 직접 사용하기 위하여 퍼지이론을 응용할 것이다.

수질모델링에서는 유입유량에 대한 입력자료로서 보통 월별 data를 요구한다. 주암호의 경우에 과거 유입유량을 월별로 구분할 때 최근 6년간의 것이 전부이기 때문에 이용할 수 있는 월별 data의 수는 단지 6개 뿐이다.<sup>1)</sup> 주암호의 년평균 월별 유입유량의 최소치 및 최대치는 Table 1에 나타내었다. 또한, 각 오염물질의 유달부하율은 오염물질 유달부하량을 오염물질 발생부하량으로 나누면 계산될 수 있다. 본 연구에서는 오염물질 유달부하량을 추정하기 위해 WASP5 모델을 이용하여 유달부하량에 관한 민감도 분석을 실시하였다. 이러한 민감도 분석은 최근 3년간의 월별 오염물질 발생부하량을 입력한 후에 수질 측정치와 예측치가 비슷하게 될 때까지 점차 양을 줄여 가면서 수행하였다. 이 결과로 나타난 값이 호수로 실제 유입된 유달부하량이라고 보았으며, 주암호의 오염물질별 유달부하율은 Table 1에 나타내었다. 유달부하율을 구하는데 최근 3년간의 수질측정치가 사용되었기 때문에 수질측정치의 수는 월별로 3개이며, 이에 대응되는 유달부하율도 월별로 단지 3개뿐이다.<sup>1)</sup> 따라서 이러한 3개의 data를 사용하여 유달부하율의 최소치와 최대치를 산출하였다. 주암호의 수질모델링에 대한 상세한 내용은

Table 1. Monthly water quantity and pollution loading rate inflowed to Juam lake

Classification		Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Water Inflow (m <sup>3</sup> /sec)	low	1.6	1.0	2.7	2.5	3.4	2.4	1.6	4.1	2.3	0.7	2.5	2.1	
	high	3.2	4.9	6.6	10.2	21.5	30.4	60.1	154.9	39.3	12.0	6.1	7.3	
	average	2.3	2.5	4.8	6.0	11.7	14.6	26.5	55.5	13.0	5.1	4.4	3.7	
BOD loading rate	low	0.201	0.228	0.095	0.109	0.081	0.082	0.086	0.031	0.047	0.053	0.093	0.149	
	high	0.282	0.289	0.298	0.325	0.345	0.439	0.484	0.483	0.366	0.299	0.294	0.280	
	average	0.235	0.266	0.211	0.232	0.181	0.208	0.219	0.206	0.165	0.194	0.225	0.234	
T-N loading rate	low	0.071	0.076	0.110	0.146	0.127	0.131	0.244	0.127	0.096	0.086	0.030	0.035	
	high	0.104	0.115	0.160	0.192	0.177	0.502	0.963	0.215	0.162	0.107	0.080	0.220	
	average	0.089	0.098	0.137	0.167	0.145	0.257	0.525	0.167	0.133	0.098	0.059	0.109	
T-P loading rate	low	0.008	0.008	0.007	0.008	0.010	0.010	0.009	0.009	0.004	0.003	0.003	0.002	
	high	0.011	0.012	0.011	0.012	0.012	0.016	0.011	0.011	0.006	0.006	0.004	0.003	
	average	0.010	0.010	0.009	0.010	0.011	0.012	0.010	0.010	0.005	0.004	0.003	0.002	

Note : loading rate=amount inflowed to lake/amount discharged to pollution source

후에 설명될 것이다.

주암호의 경우에서와 같이 유입유량과 유달부하량에 대한 data 수가 매우 적을 때 이러한 data를 이용하여 확률적으로 표현되는 유입유량 또는 유달부하량 분포곡선(유량 또는 부하량의 불확실성 정도를 나타내는 확률분포함수의 모양)을 만들기는 어렵다. 이와 같이 이용할 수 있는 data의 수가 적고 어떤 변수의 불확실한 값을 확률적으로 표현하기 곤란할 때에는 확률이론에 기초한 통계적 분석이 어렵다. 이러한 경우에 많이 응용되는 것이 퍼지이론이다. 앞에서 설명한 바와 같이 퍼지이론은 어떤 변수 값에 대한 불확실성의 크기를 확률분포함수 대신에 소속함수(Membership function)의 형태로 표현한다. 장래의 불확실성을 내재한 유입유량 또는 유달부하량의 숫자는 삼각형 모양의 소속함수를 갖는다고 본 연구에서는 가정하였으며, 이러한 모양은 다음과 같이 만들 수 있다. 1월부터 12월까지 각각의 유입유량의 년평균 월별 실측치들에 대한 최저치(L<sub>q</sub>), 최고치(U<sub>q</sub>) 및 평균치(m<sub>q</sub>)를 구한 값은 Table 1에 나타낸 바 있다. 본 연구에서는 장래에 재현 가능한 유입유량(Q)의 월별 최대구간은 L<sub>q</sub>부터 U<sub>q</sub>까지라

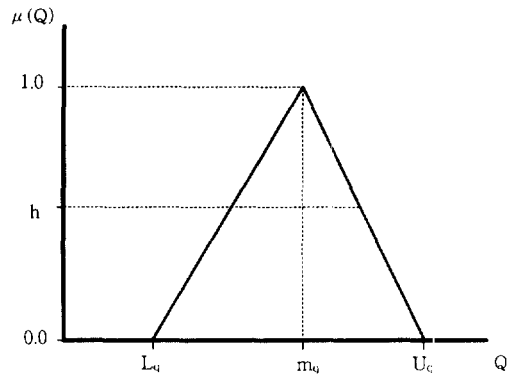


Fig. 1. Estimate of inflowed water quantity (Q) as a fuzzy number.

고 보았으며, 재현 가능성이 가장 높은 월별 유입유량의 값은 m<sub>q</sub>와 일치한다고 가정하였다. 이와 같은 3개의 값들(L<sub>q</sub>, U<sub>q</sub>, m<sub>q</sub>)을 이용하면 Fig. 1과 같은 유입유량에 대한 삼각형 모양의 소속함수가 만들어질 수 있다. 마찬가지로 방법으로 유달부하율(W)의 최저치(L<sub>w</sub>), 최고치(U<sub>w</sub>) 및 평균치(m<sub>w</sub>)를 구하고, 이 3개의 값들(L<sub>w</sub>, U<sub>w</sub>, m<sub>w</sub>)을 이용하면 유량의 경우와 같이 유달부하율에 대한 삼각형 모양의 소속함

수가 만들어 진다. 이러한 소속함수를 활용하여 유입유량 또는 유달부하량의 불확실성을 표현하면 유입유량 또는 유달부하량의 불확실한 값이 퍼지숫자로 전환되었다고 한다. Fig. 1에서 삼각형의 면적이 크면 클수록 유입유량의 불확실성이 크다는 것을 의미한다.

### 2.3. Simulation 입력값 결정

Fig. 1에 보여진 바와 같이 퍼지숫자는 하나의 점으로 표현되는 값이 아니라 소속값(Membership degree)  $h$ 에 의해 한정되는 구간값으로 나타난다. 그러나 WASP5와 같은 수질예측 모델에서는 구간값(Interval value)이 아닌 점값(Point value)을 입력자료로 요구한다. 따라서 주어진 구간내에서 모델의 입력값이 될 수 있는 어느 한 점을 무작위로 선택하기 위하여 본 연구에서는 Chanas and Nowakowski<sup>5)</sup>에 의해 개발된 퍼지 simulation 방법을 도입하였다. 어떤 퍼지숫자로부터 하나의 점값을 무작위로 선정하기 위한 방법은 Fig. 1의 도움을 가지고 다음과 같이 설명할 수 있다.

- Step 1: Select a uniform random number  $h$  between 0 and 1.
- Step 2: Select a uniform random number  $\kappa$  over the  $h$ -level set, that is, between  $[m_q - (1-h)(m_q - L_q)]$  and  $[m_q + (1-h)(U_q - m_q)]$ .
- Step 3: Use the randomly chosen value as a point value of the fuzzy number  $Q$ .

위에서 설명된 과정에 의해서 유입유량 및 유달부하량에 대한 무작위성 숫자(Random number)가 매년 한쌍씩 다르게 선택될 때마다 장래수질에 대한 simulation의 결과도 다르게 나타날 것이다.

## 3. 주암호 수질모델링

### 3.1. 모델의 선정

호수는 하천과 달리 용존산소의 고갈을 일으킬 정

도로 유기물 부하가 크지는 않으나, 체류시간이 길어서 플랑크톤 등의 생물이 많이 자랄 수 있어 부영양화의 가능성이 매우 높다.<sup>6,7)</sup> 또한, 하천에서는 수질의 공간적 변화가 종적이고 완만한 반면에 호수에서는 수질변화의 방향이 수직방향이며 변화폭이 크다. 이와 같은 이유 때문에 대부분의 호수에 대한 모델은 조류의 성장이나 인, 질소와 같은 무기 영양물질을 중점적으로 다루고 있다. 따라서 BOD와 DO 농도보다는 플랑크톤의 변화양상 등이 더욱 중요한 의미를 가질 수 있다. 호수의 수질에 가장 많은 영향을 주는 인자는 유입유량과 혼합 특성, 체류기간 동안의 물리·화학적 반응과정, 생물의 성장과 영양물질의 제거나 증가에 있어서 수생생물들의 역할 등이다.

수질예측 모델은 수리학적 복잡성 정도에 따라서 무차원 모델, 구획 모델, 1차원 모델, 2 또는 3차원 모델로 나눌 수 있다. 무차원 모델은 소규모 호수의 완전혼합을 가정한 모델이며, 구획 모델은 수체의 성질이 서로 다른 횡단면의 구획으로 나누겨, 1차원 모델은 수심에 따른 농도경사, 광도 경사 등을 고려하며, 2 또는 3차 모델은 종방향이나 횡방향 변화와 수직적 변화를 고려하여야 할 경우에 적용된다. 주암호의 물은 생활용수와 공업용수로 이용되고 있기 때문에 호수의 수질예측은 보다 정확하게 이루어질 필요성이 있다. 호수의 수질예측을 위해서 사용할 수 있는 모델로는 MIT, Battele, WASP5, Hydro-Science, WQRRS, Box-Mixing 등이 있으나,<sup>1)</sup> 본 과업에서는 국내외에서 이미 사용한 경험도 많을 뿐만 아니라 그 계산능력의 우수성이 입증된 모델인 WASP5를 사용하였다. WASP5 모델은 1차원, 2차원 또는 3차원의 형태로 호수의 수질변화를 모의할 수 있다.

### 3.2. WASP5 모델의 구조

WASP5 모델의 지배방정식은 연속성과 물질수지 법칙이 이용되는 질량보존 방정식이며, 이 모델은 수체의 거동을 모의하는 DYNHYD5(Hydrodynamics program) 부분과 오염물질의 거동과 상호작용을 모의하는 좁은 의미의 WASP5(Water quality program) 부분으로 나누어진다.<sup>2)</sup> WASP5 부분은 다시 부영양화, DO, BOD, 영양염류 등의 보편적인

오염현상을 모의하는 EUTRO5 부모모델과 유기화학물질, 금속물질 등의 독성물질에 의한 오염현상을 모의하는 TOXI5 부모모델로 구분되어 진다. 이러한 두 가지의 부모모델은 모두 유속, 유량, 수심 등의 흐름 입력자료를 필요로 하고, 이 흐름 입력자료는 DYNHYD5 모델의 결과를 불러서 사용하거나, 두 가지 부모모델에 직접 입력할 수 있다.

주암호는 독성물질에 의한 오염현상을 보이고 있지 않기 때문에 독성물질의 오염현상 파악에 필요한 TOXI5 부모모델은 본 연구에서는 필요하지 않다. 또한, EUTRO5 부모모델에서 요구하는 호수의 유입유량, 유속, 수심 등의 흐름 입력자료는 기존의 실측치를 직접 활용할 수 있기 때문에 이러한 흐름 입력자료를 얻기 위해서 사용하는 DYNHYD5 부모모델도 역시 필요하지 않다. 따라서 주암호의 수질변화 모의에는 EUTRO5 부모모델만이 필요하다. EUTRO5 부모모델에 의하여 모의 가능한 수질항목으로는 암모니아성 질소, 질산성 질소, 무기 인산염, 식물성 플랑크톤, 탄소성 생물·화학적 산소요구량(Carbonaceous BOD), 용존산소, 유기질소, 유기인 등이 있다. 이 부모모델에서 모의하는 수질항목간의 반응 모식도는 Fig. 2에 나타내었다. 모델의 중심은 식물성

플랑크톤이 되며, 식물성 플랑크톤의 성장에 빛과 무기영양염류가 직접적으로 관련되어 있음을 알 수 있다. 또한, 주요 수질항목인 BOD, DO도 식물성 플랑크톤 및 영양염류와 연결되어 계산된다.

EUTRO5 부모모델은 6종류의 복잡도(Complexity level)에 대하여 수행할 수 있다.<sup>2)</sup> 복잡도 1은 저니층의 산소요구량과 유기물질의 침전이 고려된 Streeter-Phelps 모델이고, 복잡도 2는 BOD를 CBOD와 NBOD로 구분한 수정된 Streeter-Phelps 모델이다. 복잡도 3은 완전전형 DO 수치식으로서 NBOD 분해과정을 광화작용(mineralization) 및 질산화로 구분하였고, 식물성 플랑크톤 농도에 따른 광합성과 호흡의 영향을 포함시켰다. 복잡도 4의 단순부영양화 모델은 식물성 플랑크톤의 성장과 사멸 그리고 그것이 영양염류의 순환과 용존산소 수지에 미치는 영향을 모의하며, 복잡도 5의 intermediate 부영양화모델은 단순 부영양화 모델에 유기인과 질소의 광화작용에 대해 식물성 플랑크톤이 미치는 영향, 질산화 작용에 대한 용존산소의 제한 등 여러개의 비선형 항목을 추가하였다. 복잡도 6의 부영양화 모델은 복잡도 5에 저니층 구획의 수질모의를 추가하였고, 확산에 의해 수체와의 용존물질의 교환이 일어나고, 입자상 물질은 저니층 구획에 침전되거나 세굴된다.

### 3.3. WASP5 모델수행의 기본조건

- 풍속에 의한 항은 고려 안함 - 본 모델의 적용 대상지역인 주암호 주변의 월평균 풍속은 0.845~1.7m/sec이다. 그러나 Ambrose 등<sup>8)</sup>이 의하면 풍속이 6.0m/sec 미만일 경우, 재포기 등을 포함한 바람의 영향을 무시할 수 있다. 따라서, 바람에 의한 영향은 무시하였다.
- 기온, 일사량 및 일조율 - 전라남도 순천시 승주 기상관측소에서 최근 20년 동안 측정된 자료를 산술평균하여 입력하였다. WASP5 모델에서는 기상자료의 공간변화를 고려할 수 있도록 되어 있으나, 주암호 유역내의 기상관측소는 1개뿐이어서 공간적인 기상변화는 고려하지 않았다.
- 염도 무시 - 염도는 포화 용존산소농도의 계산에 관여하는 항목으로서 하구 및 해양 지역 또는 염분이 있는 지역에서는 염도를 무시할 수 없다. 그

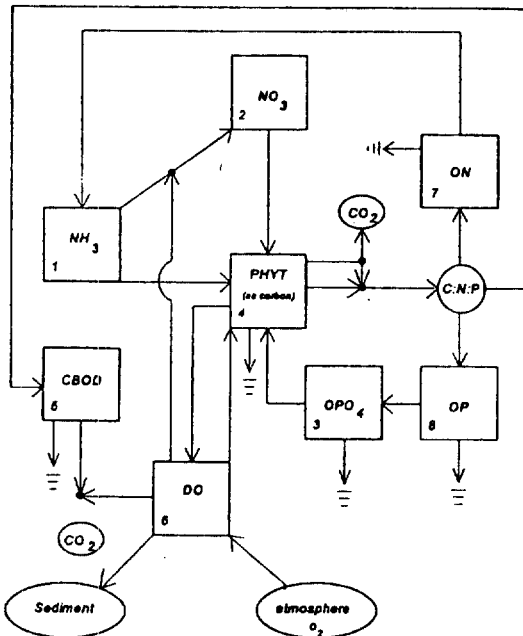


Fig. 2. EUTRO5 state variable interactions.

러나 주암호는 담수이므로 염도는 무시하였다.

- 조류의 동물성 플랑크톤(Zooplankton)에 의한 포식율은 고려 안함 - 주암호내 동물성 플랑크톤에 의한 식물성 플랑크톤의 포식율을 조사한 자료가 없기 때문에 동물성 플랑크톤에 의한 식물성 플랑크톤의 포식율은 고려하지 않았다. 그러나 이러한 영향은 조류의 순수 사멸률(자연사멸률과 독극물에 의한 사멸률)을 나타내는 변수값에 의해 간접적으로 보완된다. 즉, 동물성 플랑크톤에 의한 식물성 플랑크톤의 포식율을 무시함으로써 순수 사멸률에 대한 변수값은 실제보다 증가할 수 있다.
- 각 조사지점에서 측정한 수질항목들의 값은 최근 3년간의 것을 사용하여 반응상수들의 값을 보정하였다. 주암호의 수질측정은 1993년부터 이루어졌기 때문에 1997년까지 5년간의 자료를 이용할 수 있다. 그러나 담수가 시작된 이후로 초기 2년간은 호수의 수질변화가 급격히 변화되는 시기여서, 이러한 기간동안에 측정된 수질측정값들을 사용하여 WASP5 모델의 반응상수값들을 보정하는 것은 적당하지 않다고 판단하였다.
- WASP5 모델에서 사용하는 6종류의 단계별 복잡도들(Complexity level) 중에서 단계 4를 적용하였다. 단계 4에서 사용되는 반응상수들의 값은 문헌에 제시된 여러값들을 산술평균하여 모델에 입력하였고, 이러한 값들을 기초로 하여 반응상수값들의 보정작업은 시작되었다.
- WASP5 모델은 3차원의 형태로 호수의 수질변화를 모의할 수 있다. 그러나 주암호의 경우에는 횡방향의 길이가 상대적으로 짧고, 수질이 종방향으로만 측정되어 횡방향의 수질자료가 없기 때문에 본 연구에서는 3차원이 아닌 2차원(종방향 및 수심방향)의 수질변화만을 모의하였다.

### 3.4. 주암호의 구획 분할

주암호의 유역도는 Fig. 3과 같다. 조절지점을 제외한 주암댐의 총저수용량은  $457 \times 10^6 m^3$ 이며 유효저수용량은  $412 \times 10^6 m^3$ 이고 홍수조절용량은  $60 \times 10^6 m^3$ 이다. 호수의 수질예측을 위한 입력자료 중 가장 우선되는 것이 호수의 구획분할(Segmentation)이다. 구획분할은 모델 적용지역의 경계선정, 적절

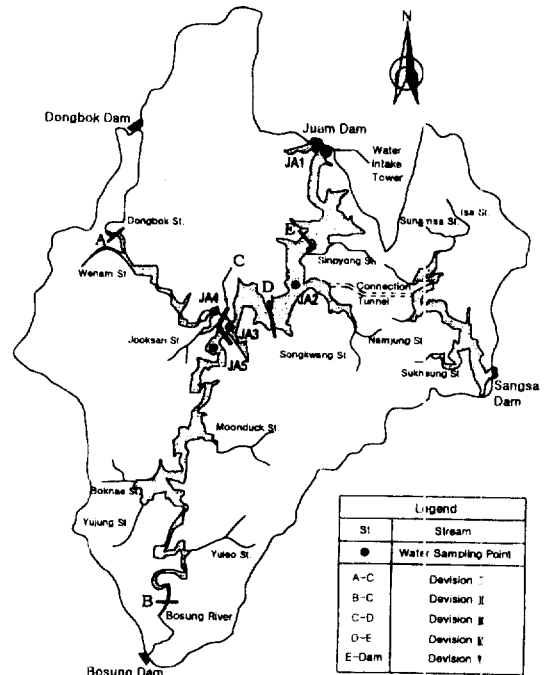


Fig. 3. Watershed of Juam lake.

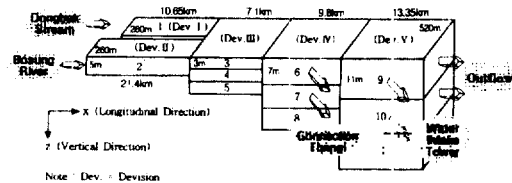


Fig. 4. Segmentation of Juam lake for water quality prediction.

한 경계분할, 구획된 구획의 표면적 수심높이의 산출과정으로 구성된다.

본 연구에서는 주암호의 구획이 종방향으로 4개, 수직방향으로 11개가 되도록 나누었으며, 각 구획의 크기는 Fig. 4에 보여진 바와 같다. 각 구획에는 수질측정지점이 구획당 1개씩 포함되도록 하였다.

### 3.5. 주암호의 유입유량 및 오염물질 유입량 산정방법

WASP5 모델에서는 년평균 오염물질 유입량이 아닌 월별 일평균 유입량을 입력자료로서 요구한다.

점원에서 배출되는 오염물질은 월별로 동일하다고 가정할 수 있으나, 비점원에서의 배출량은 월별로 매우 다르다. 따라서 본 과업에서는 비점원에서의 년평균 배출량을 월평균 배출량으로 환산하기 위하여 환경부의 "비점오염원 조사연구사업 보고서"<sup>9)</sup>에 나타난 비점오염원별 각 오염물질의 월별 유출량 자료를 이용하였다.

주암호의 배수구역별 오염물질 배출량에는 보성강댐에서 방류되는 물에 포함된 오염물질량도 포함시켰다. 즉, 주암호의 상류에 위치한 보성강댐을 하나의 점오염원으로 책정하였다. 그러나 동북댐에서는 물을 방류하지 않기 때문에 이로 인한 오염물질의 유입은 없는 것으로 보았다. 1997년도를 기준으로 주암호 유역에서 배출되는 BOD, T-N, T-P의 오염물질 배출부하량은 각각 3,893.3 kg/일, 815.9 kg/일, 93.2kg/일이다. 이 중에서 가축이 차지하는 BOD, T-N, T-P의 비율은 각각 44.65%, 34.37%, 53.99%이고 인구에 의한 비율은 각각 19.84%, 11.59%, 23.40%로 나타나고 있어 이 유역의 오염물질 주요 배출원은 가축과 인구라고 할 수 있다. 한편, 주암호 총 유량의 24%는 구획 1번, 60%는 구획 2번, 5%는 각각 구획 6~8번, 0.4%는 구획 9번, 0.3%는 구획 10번과 11번으로 각각 들어온다. 이러한 비율은 각 구획에 속해 있는 하천의 유량 실측치 및 강우집수 면적을 기초로 하여 산출되었다. 도수터널, 취수탑 및 댐을 통한 방류량은 수자원공사에서 실측한 자료와 동일하다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1. WASP5 모델변수의 보정 및 검증 결과

본 연구에서는 1995년부터 1997년까지 주암호 5개 지점에 대한 월별 수질 실측치를 사용하여 모델 변수들의 보정과 검증을 수행하였다. 모델변수들의 보정은 1997년 자료(수질 및 유량 실측치)를 이용하여 이루어졌고, 이 결과를 다른 환경(1995년과 1996년)에 적용함으로써 모델의 검증을 실시하였다. 수질항목별 실측치와 예측치의 유사한 정도는 다음의 식에 나타난 상관계수(Correlation Coef-

ficient)의 값을 구함으로써 검증될 수 있다. 상관계수  $r(X_1, X_2) = [\sum(X_{1i}-X_{1m})(X_{2i}-X_{2m}) / (n-1)] / (S_{X_1}S_{X_2})$ .<sup>10)</sup> 여기에서  $X_{1i}$ =i-번째 실측치;  $X_{1m}$ =실측치들의 표본평균;  $X_{2i}$ =i-번째 예측치;  $X_{2m}$ =예측치들의 표본평균;  $n$ =표본의 수;  $S_{X_1}$ = $X_1$ 의 표준편차;  $S_{X_2}$ = $X_2$ 의 표준편차이다. 상관계수  $r(0 \leq r \leq 1)$ 의 값이 1에 가까울수록 실측치와 예측치의 값은 유사하며, 반대로 0에 가까울수록 실측치와 예측치의 차이는 큰 것이다.

월별 수질 실측치는 실측된 달의 어느 한 시점을 대표하나 모델에 의한 수질 예측치는 예측된 달의 월평균치를 의미하기 때문에 1995년부터 1997년까지 월별 수질 실측치와 예측치가 정확히 일치되기는 어렵다. 따라서 본 연구에서는 실측치와 예측치의 값이 최대한 유사하여 질 때까지 변수보정 작업을 실시하였다. 이러한 작업이 종료된 이후에 수질측정 지점별로 Chl-a, T-P, T-N, BOD 각각의 상관계수 값을 구하여 보면 0.75~0.95 사이로 나타난다. 보정작업을 실시한 총 5개의 수질측정 지점들 중에서 호수의 취수탑 인근지점(구획 9)에 대한 모델변수의 보정결과(상관계수)를 Fig. 5에 나타내었다. 수질 예측치의 T-N 값은 유기질소, 암모니아성 질소 및 질산성 질소의 예측치들을 합한 것이며, T-P 값은 유기인과 무기 인산염의 예측치들을 더한 값이다. WASP5 모델의 검증작업을 통해 주암호에 적합하도록 보정된 주요 반응상수들의 값은 Table 2에 나타내었다.

### 4.2. 주암호의 장래수질 예측 결과

본 연구에서는 앞에서 설명한 수질예측 방법을 사용하여 현재의 환경하에서 주암호의 장래수질이 어떻게 변화될 것인지를 각 구획별로 추정하였으며, 이 중에서 주암호 취수탑 인근지점(구획 9)의 오염물질별 년평균 수질농도에 대한 예측결과를 Figs. 6~9에 나타내었다. 여기서 현재의 환경조건이란 오염물질 발생부하량을 삭감하기 위한 환경기초시설들이 앞으로 1997년도와 동일하다는 것을 의미한다. 장래수질의 년도별 계절변화는 1998년도 한국수자원공사 보고서에 나타내었다.<sup>1)</sup>

WASP5 모델의 반응상수들은 과거의 유입유량



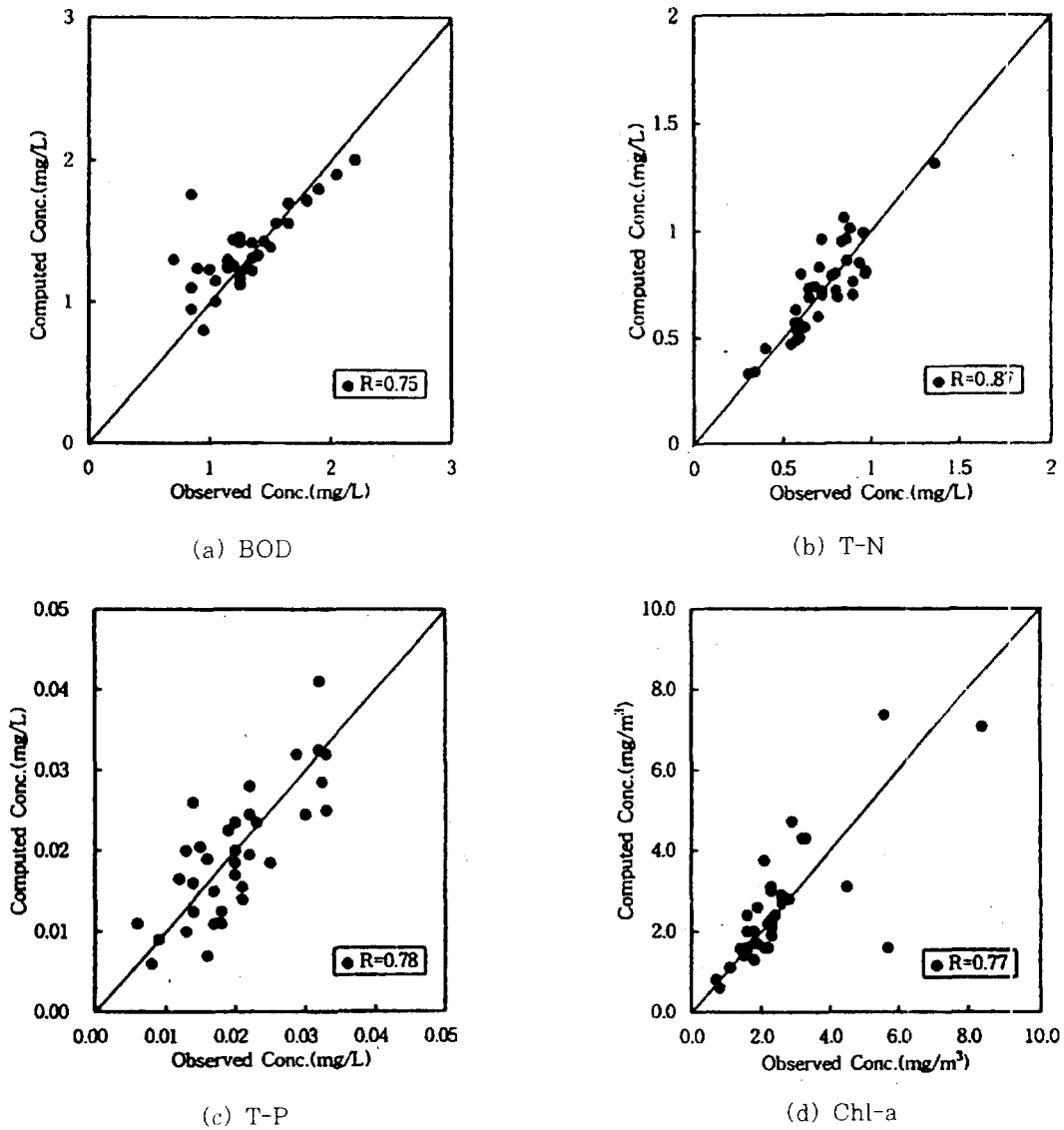


Fig. 5. Correlation between observed value and predicted value.

및 수질측정치에 기초하여 주암호에 적합하도록 보정되었기 때문에 이러한 값들은 불확실성을 내포하지 않는 것으로 가정할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 보정값들의 그 자체를 수질모델링의 입력자료로서 사용하였다. 그러나 모델의 가장 중요한 입력변수라고 할 수 있는 유입유량과 유달부하량은 불확실성을 내포하고 있기 때문에 이 2개의 값들 각각은 "2.3. Simulation 입력값 결정" 방법에 따라 매년 20개씩 서로 다른 값을 선택하여 모델에 입력하였다. 주암호에 대한 장래수질을 예측하기 위하여 1998

년부터 2010년까지 20번의 simulation을 실시하였고, 이로부터 각 년도별로 20개의 서로 다른 예측치를 얻었다. 이러한 20개 수질예측치들 중에서 가장 높은 쪽으로 2개, 가장 낮은 쪽으로 2개를 선택하여 버리고, 나머지 16개의 예측치를 사용하여 각 년도의 최저치, 최고치 및 평균치를 구하였다. 한편, 각 오염원의 오염물질 발생부하량의 년도별 증감량(인구 및 전담면적 감소분)은 3~4년 단위로 구분시켜 모델에 입력하였다. 즉, 1998~2000년, 2001~2003년, 2004~2007년, 2007~2010년의

Table 2. Model parameter values estimated for Juam lake

Reaction parameters	Value used
Nitrification rate at 20°C, day <sup>-1</sup>	0.13
temperature coefficient for K12C	1.08
Half-saturation constant for nitrification-oxygen limitation, mgO <sub>2</sub> /L	2.0
Denitrification rate at 20°C, day <sup>-1</sup>	0.50
Temperature coefficient for K20C	1.08
Half-saturation constant for denitrification-oxygen limitation, m O <sub>2</sub> /L	0.1
Saturated growth rate of phytoplankton, day <sup>-1</sup>	1.5
Temperature coefficient	1.068
Light formulation switch	1.0
Maximum quantum yield constant	720
Chlorophyll extinction coefficient	0.017
Carbon-to-chlorophyll ratio	90
Saturation light intensity for phytoplankton	300
Nitrogen half-saturation constant for phytoplankton growth	0.01
Phosphorous half-saturation constant for phytoplankton growth, mgPO <sub>4</sub> -P/L	0.001
Endogenous respiration rate of phytoplankton at 20°C, day <sup>-1</sup>	0.13
Temperature coefficient for phytoplankton respiration	1.045
Non-predatory phytoplakton death rate, day <sup>-1</sup>	0.03
Grazing rate on phytoplakton per unit zooplankton population, L/cell-day	0
Nutrient limitation option	0
Decomposition rate constant for phytoplankton in sediment at 20°C, day <sup>-1</sup>	0.02
Temperature coefficient for decomposition of phytoplankton in sediment	1.08
Phosphorus-to-carbon ratio in phytoplankton, mgP/mgC	0.025
Nitrogen-to-carbon ratio in phytoplankton, mgN/mgC	0.25
CBOD deoxygenation rate at 20°C, day <sup>-1</sup>	0.01
Temperature coefficient for carbonaceous deoxygenation in water column	1.047
Decomposition rate of carbonaceous BOD in the sediment at 20°C, day <sup>-1</sup>	0.004
Temperature coefficient for carbonaceous deoxygenation in sediment	1.08
Half saturation constant for carbonaceous deoxygenation oxygen limitation	1.85
oxygen to carbon ratio in phytoplankton, mgO <sub>2</sub> /mgC	2.67
Reaeration rate constant at 20°C for entire water body, day <sup>-1</sup>	1.0
Mineralization rate of dissolved organic nitrogen, day <sup>-1</sup>	0.06
Temperature coefficient for K1013C	1.047
Decomposition rate constant for organic nitrogen in sediment at 20°C, day <sup>-1</sup>	0.004
Temperature coefficient for decomposition of organic nitrogen in sediment	1.08
Mineralization rate of dissolved organic phosphorus, day <sup>-1</sup>	0.22
Temperature coefficient for K58C	1.047
Decomposition rate of organic phosphorus in sediment at 20°C, day <sup>-1</sup>	0.004
Temperature coefficient for decomposition of organic phosphorus in sediment	1.08

로 년도를 구분하고, 각 구분년도내에서는 오염물질 발생부하량에 대한 증감량이 동일하다고 보았다. 주

암호의 수질은 시간이 지남에 따라 모든 항목의 수질이 점점 악화되는 경향을 보이다가 2010년에 가

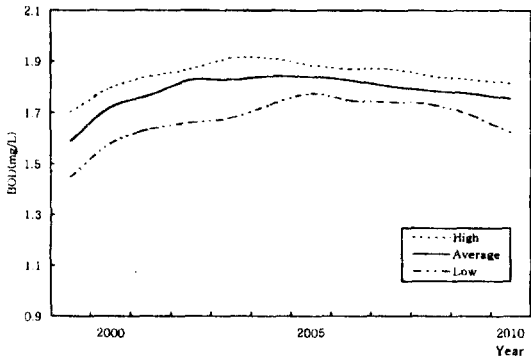


Fig. 6. Results of BOD prediction near water intake tower of Juam lake.

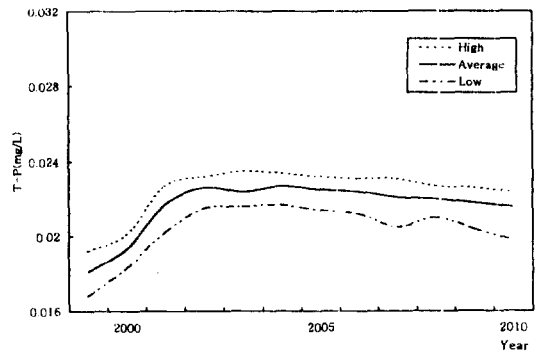


Fig. 8. Results of T-P prediction near water intake tower of Juam lake.

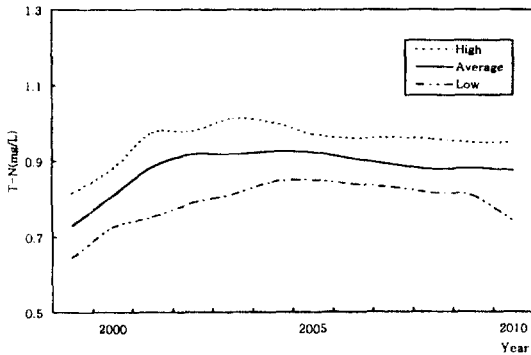


Fig. 7. Results of T-N prediction near water intake tower of Juam lake.

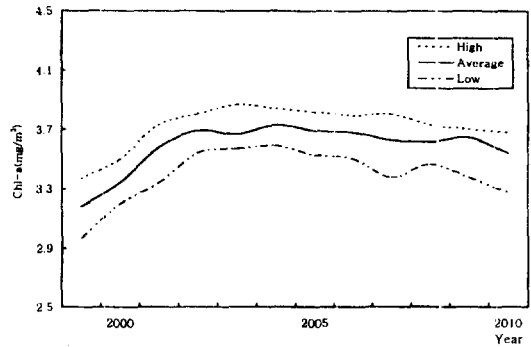


Fig. 9. Results of Chl-a prediction near water intake tower of Juam lake.

까워지면 수질이 약간 향상되는 것으로 나타나고 있다. 이러한 현상은 주암호 유역의 인구와 전답이 각각 약 5%와 2% 정도씩 매년 감소하는 추세에 있기 때문에 발생한 것으로 판단된다. 그러나 2010년경의 수질예측 결과는 1997년도의 수질 측정치보다 더욱 나쁘게 나타나고 있다. 즉, 목표년도인 2010년경에 주암호의 COD, T-N, T-P의 농도는 각각 2.92mg/L, 0.875mg/L, 0.022mg/L이고, 상사호의 경우에는 각각 2.70mg/L, 1.246mg/L, 0.027mg/L이다. WASP5 모델의 예측항목에는 COD가 없으나 호수의 수질등급 판정에는 BOD가 아닌 COD를 기준으로 하고 있다. 주암호의 BOD/COD의 비율은 0.58 정도이기 때문에 이러한 전환상수를 이용하여 BOD 농도를 COD 농도로 전환하였다. COD, T-N, T-P에 대한 년평균 수질예측치에 기준한다면 주암호의 수질등급은 2010년 경에도 II급수

를 유지할 수 있을 것으로 보여지나, 오염물질이 다량 유입되고 조류가 대량으로 발생하는 여름과 가을철에는 수질이 III등급을 훨씬 상회하는 것으로 나타나고 있다.

## 5. 결 론

퍼지 simulation 방법을 이용한 주암호 수질모델링의 결과로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 주암호 유입유량과 유달부하량의 경우 이용할 수 있는 data 수가 적어, 이러한 값들에 포함된 불확실성의 크기를 확률분포함수로 만들기 곤란한 경우 퍼지소속함수의 형태로 표현하는 것이 하나의 합리적인 접근방법이 될 수 있다.
- 2) 퍼지소속함수로 표현된 어떤 모델변수의 구간

값(Interval value) 사이에서 수질모델에서 요구하는 점값(Point value)을 무작위로 다르게 선택하여 simulation을 실시할 때마다 수질예측 결과는 다르게 나타난다. 이러한 방법은 입력변수값의 불확실성을 수질모델링에 그대로 반영하고 있기 때문에 입력변수값의 불확실성을 고려하지 않는 방법들에 비해 합리적이고 현실성 있는 호수의 수질예측 결과를 도출할 수 있다.

- 3) 주암호의 수질예측을 위하여 WASP5 모델을 사용하였다. 모델변수 값들의 보정은 1997년 자료를 이용하여 이루어졌고, 이 결과를 다른 환경(1995년과 1996년)에 적용함으로써 모델의 검증은 실시되었다. 수질 실측치와 예측치 사이에 유사성을 높이기 위한 보정 작업의 결과를 표현하는 상관계수의 값은 모든 수질 실측(예측)지점들에 대해서 수질항목별로 0.75~0.95 사이로 나타났다.
- 4) 주암호의 년평균 수질예측치에 기준한다면 수질이 현재보다는 악화되겠지만 목표년도인 2010년 경에도 II급수를 유지할 수 있을 것으로 추정된다. 그러나 여름과 가을철에는 수질이 III급수까지 악화되는 것으로 나타나고 있어 주암호의 수질개선대책은 시급히 마련되어야 할 것이다.

## 사 사

본 연구는 한국수자원공사의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 깊이 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 이용운, 성치남, 이병희, 정선용, 주암호 수질관리 전략개발에 관한 연구, 한국수자원공사 (1998).
2. Ambrose, R. B. and Martin, J. L., "The water quality analysis simulation program, WASP5 Part A: Model Documentation," Environmental Research Lab., Georgia, U.S.A.(1993).
3. Zadeh, L. A., "Fuzzy Sets," *Information and Control*, **8**(3), 338~353(1965).
4. Klir, G. J. and Folger, T. A., *Fuzzy Sets, Uncertainty, and Information*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., U.S.A. (1988).
5. Chanas, S. and Nowakowski, M., "Single Value Simulation," *Fuzzy Sets and Systems*, **25**, 43~57(1988).
6. Horne, A. J. and Goldman, C. R., *Limnology*, McGraw-Hill, Inc., New York, U.S.A.(1994).
7. Chapra, S. C., *Surface Water-Quality Modeling*, McGraw-Hill, Inc., New York, U.S.A.(1997).
8. Ambrose, R. B., Wool, T. A., Connolly, J. P. and Schanz, R. W., "WASP4, A Hydrodynamic and Water Quality Model Theory, User's Manual and Programmer's Guide," EPA/600/3-87/039, EPA, U.S.A.(1988).
9. 환경부, 비점오염원 조사연구사업 보고서(1995).
10. Neter, J., Wasserman, W. and Kutner, M. H., *Applied Linear Statistical Models*, Irwin, Inc., Illinois, U.S.A.(1985).