

로그선형모델을 이용한 팔당호 유입지류 수질의 연속성 시뮬레이션과 경향 분석

나 은 혜 · 박 석 순*

(이화여자대학교 공과대학 환경학과)

Continuity Simulation and Trend Analysis of Water Qualities in Incoming Flows to Lake Paldang by Log Linear Models. Na, Eun-Hye and Seok-Soon Park* (Dept. of Environmental Science and Engineering, College of Engineering, Ewha Womans University, Seoul 120-750, Korea)

Two types of statistical models, simple and multivariate log linear models, were studied for continuity simulation and trend analysis of water qualities in incoming flows to Lake Paldang. Water quality is a function of one independent variable (flow) in the simple log linear model, and of three different variables (flow, time, and seasonal cycle) in multivariate model. The independent variables act as surrogate variables of water quality in both models. The model coefficients were determined by the monthly data. The water qualities included 5-day Biochemical Oxygen Demand (BOD₅), Total Nitrogen (TN), and Total Phosphorus (TP) measured from 1995 to 2000 in the South and the North branches of Han River and the Kyoungan Stream. The results indicated that the multivariate model provided better agreements with field measurements than the simple one in all attempted cases. Flow dependency, seasonality, and temporal trends of water quality were tested on the determined coefficients of the multivariate model. The test of flow dependency indicated that BOD concentrations decreased as the water flow increased. In TN and TP concentrations, however, there were no discernible flow effects. From the temporal trend analyses, the following results were obtained: 1) no trends on BOD at all three upstreams, 2) increase on TN at the South Branch and the Kyoungan Stream, 3) decrease on TN at the North Branch, 4) no trends on TP at the North and the South Branches and 5) increase on TP at the Kyoungan Stream by 3 to 8% per years. The seasonality test showed that there were significant seasonal variations in all three water qualities at three incoming flows.

Key words : continuity simulation, trend analysis, seasonality, flow dependency, surrogate variable, log linear model, Lake Paldang

서 론

댐 건설로 형성된 인공호는 용수 공급, 전력 생산, 홍수 조절과 같은 다양한 혜택을 제공하지만, 하천생태계

를 단절시키고 수체 흐름을 정체시켜 수질을 악화시키는 등 여러 가지 환경문제를 야기한다. 식수 공급이 주목적인 인공호에서는 수질 악화가 가장 중요한 환경문제가 되고 있으며, 특히 부영양화로 인한 조류의 과대 성장이 수질 악화의 주원인이 되고 있다. 이러한 현상은

* Corresponding author: Tel: 02) 3277-3546, Fax: 02) 3277-3275, E-mail: ssp@ewha.ac.kr

주로 유역의 산업활동과 인구증가로 인해 유입지류로부터 질소나 인과 같은 영양물질이 수체로 과다하게 유입됨에 따라 야기된다. 뿐만 아니라 퇴적물로부터 용출되는 영양염류에 의해서도 큰 영향을 받는다. 즉 호수로 유입된 물질은 바닥으로 침강한 후 분해과정을 거쳐 혐기성 상태에서 용출되게 되며, 이러한 용출현상은 수온 상승현상과 밀접한 관련이 있다 (Larsen *et al.*, 1981; Nurnburg, 1988; Park and Jaffe, 1996; Park and Jaffe, 1999).

이처럼 호수의 수질은 수온과 퇴적물 그리고 유입수에 크게 영향을 받는다. 특히 몬순 기후의 영향으로 강우량의 계절적 변화가 매우 심한 우리나라에서는 유입수의 수량 및 수질 변화가 매우 크게 나타나며, 이는 호수 수질의 연중 변화를 결정하는 중요한 요인이 되고 있다 (An and Park, 2002; An and Park, 2003). 또한 수질 관리모델을 적용하는 경우에도 유입 수량과 수질에 대한 정확한 입력자료가 기본적으로 요구된다. 따라서 호수의 수질을 효과적으로 관리하기 위해서는 유입수의 수량 및 수질에 대한 시변화 상태를 파악하는 것이 무엇보다 중요하다. 그러나 유입수의 시변화 상태를 보다 정밀하게 측정하기 위해서는 많은 노력과 비용이 소모된다. 수량의 경우 대부분의 주요 수계에서는 오래 전부터 자동 측정이 이루어져 왔기 때문에 이를 활용할 수 있으나, 수질은 최근 자동측정이 시도되고 있지만 여전히 대부분의 수계에서는 월별 측정치가 활용 가능 자료이다.

측정 시간 간격이 큰 수질자료로 시변화 호수 모델을 적용할 때, 요구되는 시간적 정밀성에 부응하기 위하여 시도되는 방법이 대리변수 (Surrogate Variables) 활용법이다. 이는 유량과 같이 연속적 측정이 이루어진 자료와 대상 수질간의 관계식을 구하고, 이 식을 이용하여 연속적인 수질자료를 추산하는 방법이다. 지금까지 널리 사용되어온 방법은 수질과 유량 사이에 로그 선형 관계가 있다고 가정하는 단순로그선형모델 (Simple Log Linear Model)이며, 이 모델의 설명력을 향상시키기 위하여 계절 또는 유량에 따라 수질 자료를 계층화하고 구분된 각각의 자료에 다른 모델을 적용하는 변형된 방법이 이용되기도 한다 (Cohn *et al.*, 1992; Thomann and Muller, 1987). 또한 유량 뿐만 아니라 시간이나 그 외 관련 자료를 함께 고려한 다변수 로그선형모델 (Multivariate Log Linear Model)이 사용되기도 한다. 이 방법은 단순로그선형모델이나 그 변형법보다 수질자료의 변이를 보다 잘 설명할 수 있으며, 모델 계수값을 이용하여 수질의 경향성과 유량 의존성 그리고 계절성 등을 검토해

볼 수 있다 (Cohn *et al.*, 1992).

본 연구는 수도권 지역의 주요 용수원인 팔당호로 유입되는 남, 북한강과 경안천의 수질에 대하여 단순 로그선형 모델과 다변수 로그선형모델을 적용하여 그 적합성을 파악하였다. 또한 예측된 모델 계수들의 유의성을 검증하였으며, 이를 바탕으로 적용 수질의 경향성을 분석하였다.

재료 및 방법

1. 연구 대상 지역 및 분석 자료

팔당호는 남한강, 북한강 그리고 경안천 합류 지점에 위치한 인공호로 평균 수심 6.5 m, 수표면적 36.5 km², 총 저수량 2.5 × 10⁸ m³, 유역면적 23,800 km²이다 (Fig. 1). 팔당호의 수표면적에 대한 유역면적의 비는 약 652로, 국내 인공호 중 소양호 약 39, 충주호 약 69에 비해 매우 크며, 반면에 연평균 체류시간은 약 5일로 소양호 약 247일, 충주호 약 200일에 비해 매우 짧다 (한강유역 환경청, 1999). 이는 팔당호가 호수의 내부 생산이 수질에 미치는 영향이 비교적 적으며, 유역으로부터의 강우와 오염물질 유출에 크게 영향을 받는 수체임을 의미한다 (공과 정, 1999).

팔당호 유입지류인 남한강과 북한강, 그리고 경안천 유역은 각각 다른 특성을 보여주고 있다. 남한강 상류 유역은 대부분 산림지역이며, 지천과 하류 유역에는 농경지가 넓게 위치하고 있다. 도시는 주로 하류유역인 여주, 이천, 원주 지역에 발달되어 있으며, 도시에 인접한 일부지역에 소규모 산업시설이 위치하고 있다. 북한강 유역은 본류 인접 지역에 존재하는 소규모 농경지역을 제외하면 대부분이 산림지역이며, 남한강에 비하여 비교적 하상 경사가 급하다. 춘천시와 가평군 일대에 도시지역이 형성되어 있으나 타 수계의 도시 유역에 비해 규모가 작고 인구밀도가 매우 낮다. 경안천 유역은 수도권에 인접하여 다른 유역에 비해 인구 밀도가 높고 오염원이 밀집되어 있다. 각 지류들의 주요 특성은 Table 1에 제시되었다.

본 연구는 환경부 수질 측정망으로부터 팔당호로 유입되는 남, 북한강 그리고 경안천을 대표할 수 있는 지점에서 1995년부터 2000년까지 6년 동안 월별로 측정된 수질자료를 이용하였다 (Fig. 1). 분석대상항목은 생물화학적 산소요구량 (BOD: Biochemical Oxygen Demand), 총질소 (TN: Total Nitrogen), 그리고 총인 (TP: Total Phosphorus)이다. 유량은 건설교통부에서 운영중

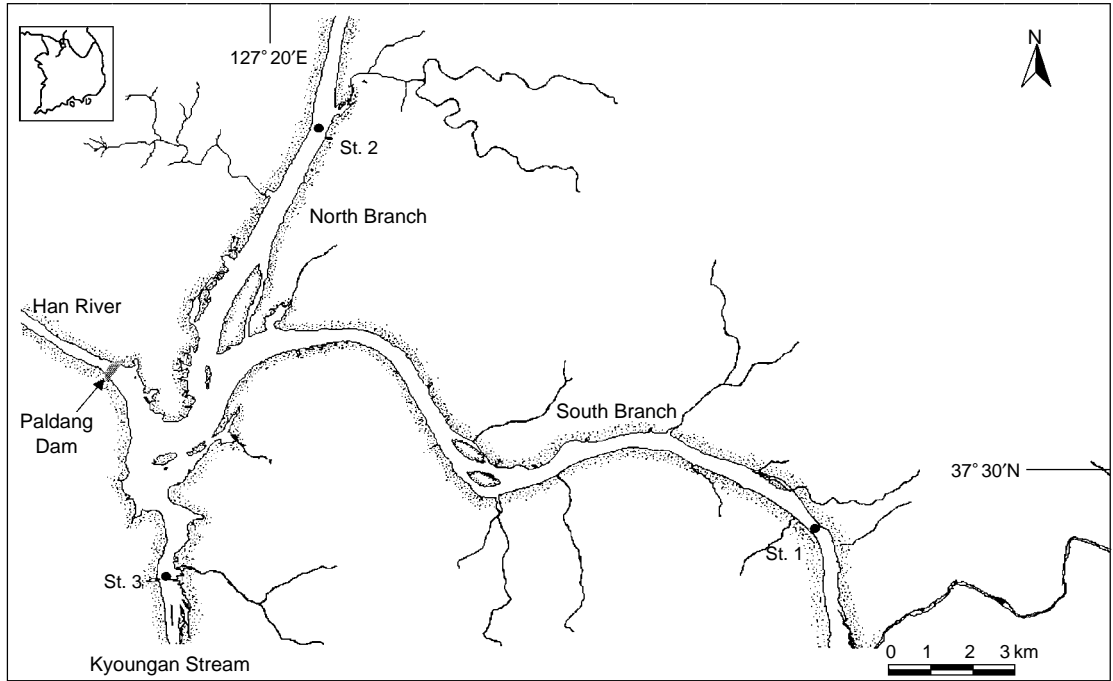


Fig. 1. Study area and locations of water quality monitoring stations.

Table 1. The three major incoming flows to the Lake Paldang.

	South Branch	North Branch	Kyoungan Stream
Drainage area, A (km ²)	12,355	10,698	564
Channel length, L (km)	382.2	317.5	49.6
Drainage mean width, B (km)	32.3	33.7	11.4
Horton's form coefficient, F (= B/L)	0.085	0.106	0.230

인 수위관측소 중 본 연구에서 이용된 3개 수질측정지점의 직상류에 위치하고 있는 관측소의 일별 유량 자료를 이용하였다.

2. 적용 모델

본 연구에서 적용된 단순로그선형모델은 수질 농도와 유량 사이에 다음과 같은 관계가 있다고 가정한다.

$$\ln[C] = \beta_1 + \beta_2 \ln[Q] + \epsilon \tag{1}$$

여기서 C는 수질 농도(mg/l, 단 TP의 경우 mg/m³), Q는 유량(m³/sec) 그리고 β는 회귀계수이다. 회귀계수 β는 오차의 제곱합을 최소로 하는 최소자승법에 의해 결정되며, 오차항목 ε는 독립적이며 정규분포(0, σ²) 한다고

Table 2. Simple log linear models.

Parameters	Incoming flow	Model
BOD (mg/l)	South Branch	$\ln(C) = -0.129 \ln(Q) + 1.222$
	North Branch	$\ln(C) = -0.293 \ln(Q) + 1.809$
	Kyoungan Stream	$\ln(C) = 2.869 \times 10^{-2} \ln(Q) + 1.340$
TN (mg/l)	South Branch	$\ln(C) = -1.244 \times 10^{-2} \ln(Q) + 0.990$
	North Branch	$\ln(C) = -0.139 \ln(Q) + 1.333$
	Kyoungan Stream	$\ln(C) = 6.228 \times 10^{-3} \ln(Q) + 1.416$
TP (μg/l)	South Branch	$\ln(C) = 0.234 \ln(Q) + 2.615$
	North Branch	$\ln(C) = 0.541 \ln(Q) - 8.804 \times 10^{-2}$
	Kyoungan Stream	$\ln(C) = 0.110 \ln(Q) + 4.562$

가정한다(Helsel and Hirsh, 1992).

Cohn et al. (1992)에 의해 제시된 다변수 로그선형모델에서는 식 2에서 보는 바와 같이 총 7개의 계수가 요구된다. 이는 상수, 유량에 대한 2차 로그함수에 관련된 2개의 계수, 시간에 대한 2차 함수와 관련된 2개의 계수, 그리고 계절의 영향을 고려한 사인곡선함수(First-order Fourier)와 관련된 2개의 계수이다. 예측된 7개의 계수를 통하여 수질 자료에서 관찰되는 유량 의존성, 계절성 그리고 시간적 경향을 파악할 수 있다.

$$\ln[C] = \beta_0 + \beta_1 \ln\left[\frac{Q}{\bar{Q}}\right] + \beta_2 \left\{ \ln\left[\frac{Q}{\bar{Q}}\right] \right\}^2 + \beta_3 [T - \bar{T}] + \beta_4 [T - \bar{T}]^2 + \beta_5 \sin[2\pi T] + \beta_6 \cos[2\pi T] + \varepsilon \quad (2)$$

여기서 T는 시간 (year), \bar{Q} , \bar{T} 는 중심 변수 (Centering Variables)이다. 최소자승법에 의해 결정되는 회귀계수 $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6$ 중 계절성과 관련된 회귀계수 β_5 와 β_6 은 다음에 제시한 식들에 의해 진폭(A)과 침두 시간(D*, days)으로 각각 변환될 수 있다.

$$A = (\beta_5^2 + \beta_6^2)^{1/2} \quad (3)$$

$$D^* = \frac{365}{2\pi} \left[\tan^{-1}\left(\frac{\beta_5}{\beta_6}\right) \right] \quad (4)$$

식 (3)에 의해 계산된 침두 시간은 최고 또는 최소 농도가 나타나는 시간이며, 만약 D*에서 최소 농도가 발생한다면 최대 농도는 6개월 후에 발생한다. A와 D*의 표준 오차는 1차 테일러 시리즈 (First-order Taylor series)를 이용하여 계산되며, 여기서 Var(β)는 β 의 분산을 의미한다.

$$SE[A] \approx \frac{[\beta_5^2 \text{Var}(\beta_5) + \beta_6^2 \text{Var}(\beta_6)]^{1/2}}{A} \quad (5)$$

$$SE[D^*] \approx \frac{365}{2\pi} \frac{[\beta_5^2 \text{Var}(\beta_5) + \beta_6^2 \text{Var}(\beta_6)]^{1/2}}{A} \quad (6)$$

중심 변수 \bar{Q} , \bar{T} 는 예측에 영향을 미치지 않으면서 계산 작업을 단순화하며, 다음과 같이 표현된다.

$$\bar{T} = \bar{T} + \frac{\sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^3}{2 \sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^2} \quad (7)$$

$$\bar{T} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i \quad (8)$$

산정된 모델의 유의성은 F-검정을 통하여 검토되었다. 다변수 로그선형모델의 경우 귀무가설과 대립가설은 각각 $H_0: \beta_0 = \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \beta_5 = \beta_6 = 0$, $H_1: \beta_i \neq 0$ 으로 주어졌으며, F-검정을 통해 귀무가설이 기각되었을 때 t-검정을 통해 각각의 추정치 $\beta_i = 0$ 에 대한 귀무가설을 분석하였다. 검정결과 p값이 0.01 (1% 유의수준)보다 작으면 매우 유의, 0.01과 0.1사이 (1~10% 유의수준)에 있으면 보통 유의 그리고 0.1 (10% 유의수준)보다 크면 유의하지 않은 것으로 판정하였다 (Helsel and Hirsch, 1992; 박, 1998; 이와 김, 2001). 본 연구의 회귀분석과 유의성 검정은 전산 통계 패키지 SPSS를 이용하였다 (이와 김, 2001).

결과 및 고찰

1. 로그선형모델 적용

단순회귀분석으로부터 얻어진 로그선형모델과 F-검정 결과를 결정계수와 함께 Table 3에 제시하였다. 또한 산정된 단순로그선형모델에 의해 예측된 수질 농도를 실측 농도와 비교한 결과를 결정계수와 함께 Figs. 2-4에 제시하였다. Table 3에서 보는 바와 같이 산정된 9개의 단순로그선형모델 중 단 4개의 모델에서 반응변수와 설명변수간에 유의 또는 매우 유의한 선형관계가 있는 것으로 나타났으며, 통계적 유의성이 확인된 4개 모델에 대한 결정계수는 0.053에서 0.133으로 팔당호 유입 수질 농도가 갖는 변이성 중 본 연구에서 산정된 단순로그선형모델에 의해 설명 가능한 부분은 15% 미만인 것으로 예측되었다.

한편 다중회귀분석을 통하여 얻어진 다변수 로그선형모델에 대한 F-검정 결과와 결정계수와 함께 Table 3에 제시하였으며, 산정된 다변수 로그선형모델에 의한 예측값과 실측값을 비교한 결과를 Figs. 2-4에 제시하였다. Table 3에서 제시된 바와 같이 산정된 9개의 다변수 로그선형모델 중 4개의 모델이 통계적으로 매우 유의하며, 나머지 5개의 모델에도 보통 유의한 것으로 나타났다. 이들 모델에 대한 결정계수는 0.186에서 0.473으로 앞서 제시한 단순로그선형모델들의 결정계수에 비해 높

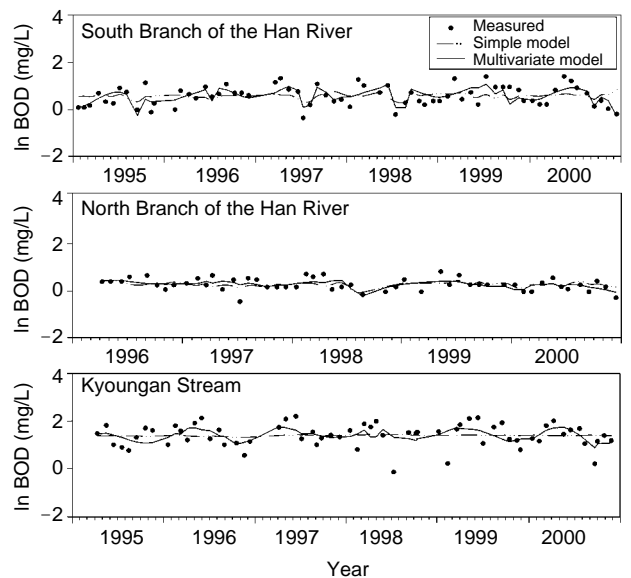


Fig. 2. Comparison between field measurements and model results-BOD.

Table 3. The statistical results from simple and multivariate log linear models.

Parameter	Location	Simple log linear models				Multivariate log linear models			
		F-value	P-value	Significance	R ²	F-value	P-value	Significance	R ²
BOD (mg/l)	South Branch	3.722	0.058	S	0.053	9.233	0.0001	H	0.473
	North Branch	7.488	0.009	H	0.133	2.598	0.030	S	0.262
	Kyongan Stream	0.230	0.633	N	0.004	2.442	0.036	S	0.204
TN (mg/l)	South Branch	0.096	0.758	N	0.002	3.000	0.013	S	0.237
	North Branch	2.246	0.140	N	0.041	4.137	0.002	H	0.346
	Kyongan Stream	1.199	0.278	N	0.019	3.596	0.005	H	0.306
TP (µg/l)	South Branch	5.271	0.025	S	0.074	2.325	0.044	S	0.186
	North Branch	6.039	0.017	S	0.104	3.243	0.009	H	0.293
	Kyongan Stream	2.171	0.146	N	0.034	2.182	0.059	S	0.192

※ H : Highly Significant, S : Significant, N : No Significant, R²: "variability explained" by the models

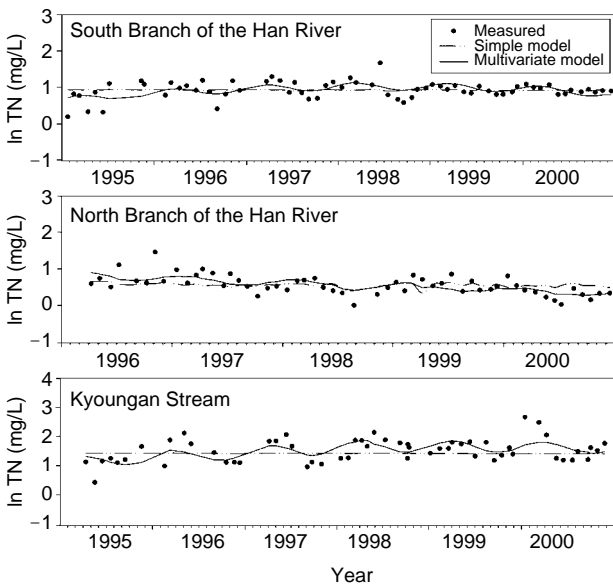


Fig. 3. Comparison between field measurements and model results-TN.

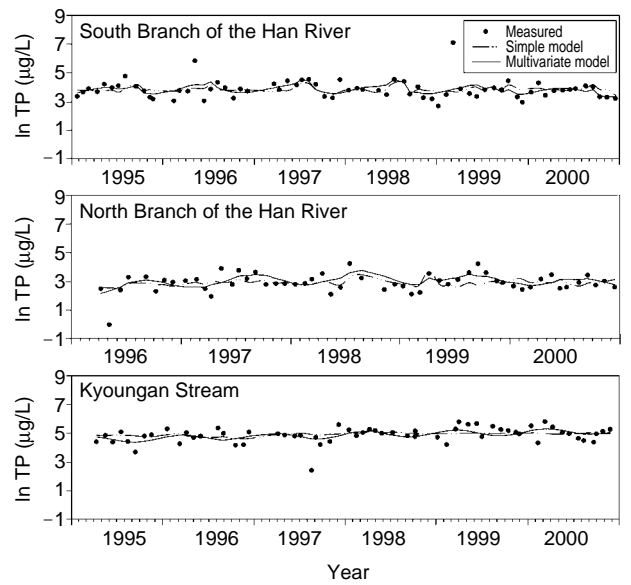


Fig. 4. Comparison between field measurements and model results-TP.

은 것으로 나타났다. 다변수 로그선형모델은 일반적으로 수질농도에서 관찰되는 변이성 중 10~50% 정도를 설명할 수 있다고 알려져 있다 (Cohn *et al.*, 1992). 따라서 본 연구에서 산정된 9개 모델은 적절한 설명력을 갖는 것으로 판단된다.

결과적으로 본 연구에서 적용된 두 종류의 로그선형 모델에 대한 유의성과 유효성을 검토한 결과, Cohn *et al.* (1992)에 의해 제시된 다변수 로그선형모델이 팔당호 유입 수질에 대한 연속적인 농도 예측과 경향성 파악에 적합한 것으로 판단되었다.

2. 유입 수질의 경향성 분석

팔당호 유입 수질의 경향성 파악에 적합한 것으로 판단된 다변수 로그선형모델의 회귀계수 $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6$ 과 산출된 β_5 와 β_6 값으로부터 변환된 A와 D*값을 Table 4에 제시하였다. 또한 이들에 대한 표준오차와 t-검정에서 산출된 유의성 결과도 함께 제시하였다.

Table 4에 제시된 바와 같이 생물화학적 산소요구량 (BOD)의 경우 수질 농도의 유량에 대한 로그선형관계를 나타내는 회귀계수 β_1 은 모든 지류에서 통계적으로 유의한 음의 값을 갖으며, 이는 남, 북한강 그리고 경안천으로부터 팔당호로 유입되는 유기물 농도가 유량이

Table 4. Coefficient values of multivariate log linear models with statistical significance.

		South Branch		North Branch		Kyoungan Stream	
		Value	SE	Value	SE	Value	SE
BOD	β_0	0.360**	0.090	0.128*	0.063	1.416**	0.102
	β_1	-0.613**	0.102	-0.419*	0.165	-0.298*	0.168
	β_2	-0.203**	0.044	-0.253	0.201	-7.831×10^{-2}	0.048
	β_3	2.559×10^{-2}	0.022	-3.790×10^{-2}	0.025	5.098×10^{-2}	0.048
	β_4	$-4.468 \times 10^{-2**}$	0.014	-1.472×10^{-2}	0.021	-3.866×10^{-2}	0.025
	β_5	5.638×10^{-5}	0.057	5.756×10^{-2}	0.050	0.244**	0.080
	β_6	-0.289**	0.062	-6.866×10^{-2}	0.049	-0.110	0.086
	A	0.289**	0.062	$8.960 \times 10^{-2*}$	0.049	0.268**	0.081
	D*	1-Jul.	11	22-May	32	26-Apr.	18
	TN	β_0	1.028**	0.063	0.523**	0.077	1.643**
β_1		-2.532×10^{-3}	0.073	-4.179×10^{-2}	0.148	6.417×10^{-2}	0.143
β_2		-4.664×10^{-3}	0.031	1.727×10^{-2}	0.113	8.687×10^{-3}	0.040
β_3		$3.164 \times 10^{-2*}$	0.016	$-9.526 \times 10^{-2**}$	0.023	$7.648 \times 10^{-2*}$	0.040
β_4		$-3.303 \times 10^{-2**}$	0.010	1.408×10^{-4}	0.019	-2.696×10^{-2}	0.021
β_5		$9.465 \times 10^{-2*}$	0.040	6.311×10^{-2}	0.045	0.187*	0.068
β_6		3.750×10^{-2}	0.043	5.364×10^{-2}	0.044	1.097×10^{-2}	0.078
A		0.102*	0.040	$8.283 \times 10^{-2*}$	0.045	0.187**	0.068
D*		10-Mar.	24	19-Feb.	31	20-Mar.	24
TP		β_0	4.123**	0.173	3.368**	0.196	4.872**
	β_1	0.295	0.195	0.212	0.380	4.767×10^{-2}	0.193
	β_2	6.454×10^{-2}	0.085	-0.159	0.290	1.751×10^{-2}	0.055
	β_3	-2.920×10^{-2}	0.043	2.911×10^{-2}	0.059	0.104*	0.055
	β_4	-2.660×10^{-2}	0.028	$-9.369 \times 10^{-2*}$	0.050	-2.847×10^{-2}	0.029
	β_5	0.179	0.110	-0.293*	0.116	0.210*	0.091
	β_6	-0.197	0.119	-0.195*	0.113	6.278×10^{-2}	0.102
	A	0.266*	0.115	0.352**	0.115	0.219*	0.092
	D*	20-May	25	28-Aug.	19	11-Sep.	27

** : Highly significant, * : Significant

증가함에 따라 감소하고 있음을 의미한다. 팔당호 지류 유역의 오염원별 부하량 및 구성비에 대한 공과 정(1999)의 조사 결과에 따르면 BOD의 경우 생활계 오염원으로부터의 부하가 가장 큰 비율을 차지하며, 토지이용에 따른 부하는 25% 미만인 것으로 나타났다. 즉 이들 지류 유역에서 유기물을 배출하는 주요 오염원은 점오염원으로 강우에 의한 비점오염물질의 유입 증가에 비해 유량 증가에 의한 희석 효과가 팔당호로 유입되는 유기물 농도에 더 큰 영향을 미치는 것으로 사료된다.

한편 박 등(1995)은 비모수 통계방법을 적용하여 1992년 시기별로 관측된 남한강과 북한강의 수질을 비교하였으며, 그 결과 두 수계 모두 유량이 증가하더라도 유기물 농도는 감소하지 않으며 이는 점오염원보다 비점오염원의 영향이 크기 때문인 것으로 보고하였다. 이러한 두 연구 결과로 미루어 볼 때 남, 북한강 유역에서는 1990년대 중반 이후 점오염원이 급격히 증가하였으

며, 이들 점오염원이 유기물에 대한 주요 오염원으로 작용하게 된 것으로 판단된다.

시간에 따른 수질 농도의 증가 또는 감소 경향을 나타내는 계수 β_3 은 BOD의 경우 모든 지류에서 유의하지 않은 것으로 나타났다. 이는 1995년부터 2000년까지 남, 북한강 그리고 경안천으로부터 유입되는 유기물 농도에 큰 변화를 보이지 않았다는 것을 의미한다. 이러한 결과는 1990년대 후반부터 추진되어온 팔당호 수질관리 노력이 효과를 보이는 것으로 해석될 수 있다. 1998년에는 ‘팔당호 등 한강수계 상수원 수질개선 특별종합대책’이 수립되어 팔당호, 남한강, 북한강 및 경안천 양안에 수변구역이 지정·고시되었으며, 이에 따라 특별대책지역 내 수변구역에서는 기존 오염원에 대한 오수배출기준이 BOD 10 ppm으로 이전보다 두 배로 강화되고 신규 오염원의 입지 또한 제한되었다(정부합동, 1998). 또한 내수면개발촉진법에 의거하여 면허제도로 운영되고 있던

가두리양식장이 수질 오염의 주요 원인으로 작용하는 것으로 판단됨에 따라 1997년부터는 팔당 특별대책지역 뿐만 아니라 상수원 관련 호수에 대해서도 면허 연장과 신규 입지가 금지되었다.

총질소(TN)의 경우에는 BOD와 달리 회귀계수 β_1 이 $-0.003 \sim 0.064$ 범위의 값을 갖으나 이들 계수는 통계적으로 유의성이 없는 것으로 나타났다. 총인(TP)의 회귀계수 β_1 값 또한 모든 지류에서 유의하지 않은 것으로 나타났다. 이는 남, 북한강 그리고 경안천으로부터 팔당호에 유입되는 영양물질 농도는 유량의 변화에 따라 증가 또는 감소하지 않는 것을 의미한다. 이 결과는 각 지류 유역으로부터 배출되는 TN과 TP는 BOD에 비해 토지이용에 따른 부하 비율이 큰 것으로 보고한 공과 정(1999)의 결과와 비교적 잘 일치한다. 팔당호로 유입되는 영양물질 농도는 유량 증가에 의한 희석 뿐만 아니라 강우에 의한 비점오염물질의 유입 증가에 상당한 영향을 받기 때문에 유량 의존성이 없는 것으로 사료된다. 팔당호에서는 점오염원 뿐만 아니라 비점오염원 역시 영양물질의 주요 배출원으로 작용하고 있으며, 이러한 현상은 팔당호 부영양화 관리의 취약성을 내포하고 있다.

TP 농도에 대한 회귀계수 β_3 은 남한강과 북한강에서는 유의하지 않으며, 경안천에서는 통계적으로 유의한 양의 값을 갖는 것으로 계산되었다. 김 등(1995)은 팔당호 부영양화의 원인을 분석하기 위하여 1988년부터 1994년까지 남한강과 북한강으로부터 팔당호로 유입되는 TP 부하량을 조사하였으며, 그 결과 이들 유입 지류로부터 팔당호로 유입되는 TP 부하량은 점진적인 증가 추세를 보이는 것으로 보고하였다. 그러나 본 연구의 대상 기간에는 TP 농도의 증가 경향은 관찰되지 않았다. 즉 90년대 후반 시행된 가두리 양식장에 대한 관리정책으로 인해 남, 북한강으로부터 팔당호로 유입되는 TP 농도의 증가 추세가 사라진 것으로 판단되며, 반면 가두리 양식장에 의한 TP 부하가 없는 경안천에서는 팔당호로 유입되는 TP 농도가 연간 10% 정도 증가하는 경향을 보이고 있다. TN 농도에 대한 회귀계수 β_3 은 남한강과 경안천의 경우에는 통계적으로 유의한 양의 값을 보이는 반면 북한강의 경우에는 통계적으로 유의한 음의 값을 갖는 것으로 나타났다. 즉 가두리 양식장에 의한 TN 부하가 20% 이상을 차지하였던 북한강의 경우에는 연간 10% 정도 감소하는 경향을 보였으나, 남한강과 경안천에서는 각각 연간 3%와 7%씩 증가하는 경향을 보였다.

수질 농도의 계절성을 나타내는 진폭 A값은 모든 지류에서 모든 적용 수질 항목에 대해 유의한 것으로 나

타났다. 이는 남, 북한강 그리고 경안천으로부터 팔당호로 유입되는 유기물 및 영양물질의 농도는 계절성을 갖는다는 것을 의미하며, 3가지 수질 항목 중 TN이 계절에 따른 변이가 가장 작은 것으로 예측되었다.

적 요

본 연구에서는 남, 북한강 그리고 경안천으로부터 팔당호에 유입되는 유기물 및 영양물질농도의 연속성 예측을 위하여 단순로그선형모델과 다변수 로그선형모델이 함께 적용되었으며, F-검정과 결정계수에 기초하여 산정된 모델의 유의성과 유효성이 검토되었다. 검토 결과 단순로그선형모델은 산정된 9개의 모델 중 4개 모델만이 통계적으로 유의한 반면 다변수 로그선형모델의 경우에는 9개 모델 모두 통계적으로 유의한 것으로 나타났다. 모델의 유효성을 평가하는 결정계수 또한 다변수 로그선형모델의 경우에 더 높게 예측되었다. 즉 팔당호 유입 수질 농도의 연속성 예측과 경향성 파악을 위해서는 다변수 로그선형모델의 적용이 더 적합한 것으로 판단되었다.

다변수 로그선형모델 결과에 기초하여 팔당호 유입 수질의 유량 의존성, 경향성, 계절성을 분석하였다. 분석 결과 모든 지류에서 유량이 증가함에 따라 팔당호로 유입되는 BOD 농도는 감소하는 것으로 나타났으며, TN과 TP의 경우에는 BOD와 달리 유량이 증가하더라도 농도는 증가 또는 감소하지 않는 것으로 나타났다. 따라서 3개 지류 유역에서 유기물을 배출하는 주요 오염원은 점오염원인 반면 영양물질의 경우에는 점오염원 뿐만 아니라 비점오염원 역시 주요 배출원으로 작용하고 있는 것으로 판단된다. 경향성을 분석한 결과 1995년부터 2000년까지 모든 지류에서 팔당호로 유입되는 BOD 농도의 증감 경향은 보이지 않았다. 남한강과 북한강으로부터 팔당호로 유입되는 TP의 경우 1988년부터 1994년까지 점진적인 증가 추세를 보이는 것으로 보고된 바 있으나 본 연구의 대상 기간인 1995년 이후에는 이러한 증가 추세는 관찰되지 않았으며, 반면 경안천으로부터 유입되는 TP 농도는 연간 10% 정도 증가하고 있는 것으로 예측되었다. 한편 북한강으로부터 팔당호로 유입되는 TN 농도는 연간 10% 정도 감소하는 반면 남한강과 경안천으로부터의 유입 농도는 각각 연간 3%와 7%씩 증가하는 경향을 보였다. 수질 농도의 계절별 변화 경향을 분석한 결과 팔당호로 유입되는 3개 지류의 유기물 및 영양물질 농도는 모두 계절성을 갖는 것으로 분석되

었으며, 이 중 가장 작은 변동폭을 갖는 수질항목은 총 질소인 것으로 나타났다.

사 사

본 연구는 한국과학기술연구원 (KIST) 금수강산21 사업의 연구지원으로 수행되었습니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

인 용 문 헌

공동수, 정동일. 1999. 하천형 인공호(팔당호)의 수환경 특성 및 수질관리. The 6th International Symposium on Environmental Issues and Alternatives for 21C. pp. 41-83.

김동섭, 김법철, 황길순, 박주현. 1995. 팔당호의 부영양화 경향(1988-1994). 한국수질보전학회지 11(4): 295-302.

박석순, 이상희, 박배경, 이상호. 1995. 비모수 통계방법을 이용한 남·북한강 지천의 수질 비교. 한국육수학회지 28(3): 299-307.

박성현. 1998. 회귀분석. 민영사, 서울.

이학식, 김 영. 2001. SPSS 10.0 매뉴얼. 통계분석방법 및 해설. 법문사, 서울.

정부합동. 1998. 팔당호 등 한강수계 상수원 수질관리 특별종합대책 : 맑은 한강-새 천년의 대계.

한강유역환경청. 1999. 팔당호 등 한강수계 상수원 수질오염원 조사보고서.

An, K.-G. and S.S. Park. 2002. An Influence of Summer Monsoon on Chlorophyll-Total Phosphorus Models in an Asian Reservoir. *Ecological Modelling*. 152: 191-

203.

An, K.-G. and S.S. Park. 2003. Influence of Seasonal Monsoon on the Trophic State Deviation in an Asian Reservoir. *Water, Air, and Soil Pollution*. 145: 267-287.

Cohn, T.A., D.L. Caulder, E.J. Gilroy, L.D. Zynjuk and R. M. Summers. 1992. The Validity of a Simple Statistical Model for Estimating Fluvial Constituent Loads: An Empirical Study Involving Nutrient Loads Entering Chesapeake Bay. *Water Resources Research*. 28(9): 2353-2363.

Helsel, D.R. and R.M. Hirsch. 1992. Statistical Methods in Water Resources. Elsevier, Amsterdam.

Larsen, D.P., D.W. Schults and K.W. Malueg. 1981. Summer Internal Phosphorus Supplies in Shagawa Lake, Minnesota. *Limnology and Oceanography*. 26: 740-73.

Nurnberg, G.K. 1988. Prediction of Release Rates from Total and Reductant-Soluble Phosphorous in Anoxic Lake Sediments. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 45: 453-462.

Park, S.S. and P.R. Jaffe. 1996. Development of a Sediment Redox Potential Model for the Assessment of Postdepositional Metal Mobility. *Ecological Modelling*. 91: 169-181.

Park, S.S. and P.R. Jaffe. 1999. A Numerical Model to Estimate Sediment Oxygen Level and Demand. *Journal of Environmental Quality*. 28(4): 1219-1226.

Thomann, R.V. and J.A. Mueller. 1987. Principle of Surface Water Quality Modeling and Control, Harper Collins Publishers, New York.

(Manuscript received 5 July 2003,
Revision accepted 25 August 2003)