

# 시계열 모형의 적용을 통한 댐 방류의 수질개선 효과 검토

김상단<sup>†</sup> · 유철상<sup>\*</sup>

경기개발연구원 환경정책연구부  
<sup>\*</sup>고려대학교 사회환경시스템공학과

## Evaluation of the Dam Release Effect on Water Quality using Time Series Models

Kim, Sangdan<sup>†</sup> · Yoo, Chulsang<sup>\*</sup>

Department of Environmental Policy, Gyeonggi Research Institute  
<sup>\*</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, Korea University  
 (Received 11 October 2004, Accepted 22 October 2004)

**Abstract** : Water quality forecasting with long term flow is important for management and operation of river environment. However, it is difficult to set up and operate a physical model for water quality forecasting due to large uncertainty in the data required for model setting. Therefore, relatively simpler stochastic approaches are adopted for this problem. In this study we try several multivariate time series models such as ARMAX models for the possible substitute for water quality forecasting. Those models are applied to the BOD and COD levels at Noryangin station, Han river, and also evaluated the effect of release from Paldang dam on them. Monthly BOD and COD data from 1985 to 1991 (7 years) are used for model building and another two year data for model testing. As a result of the study, the effect of improvement on water quality is much more effective combining with the water quality improvement of dam release than considering only increment of dam release in the downstream Han river.

**keywords** : Water quality, Dam release, Stochastic model

### 1. 서론

우리나라 강수의 시간분포는 계절에 따라 매우 심한 변화를 보이며, 그에 따라 하천유량의 계절변화도 심하여 7, 8, 9월 3개월 동안의 유출량이 1년 전체 유출량의 60% 가까이 차지하고 있다. 또한 우리나라 주요 수계에는 크고 작은 댐이 축조되어 있어 하천유량이 조절되고 있으며, 이와 같이 대규모 다목적 댐이나 발전 댐 혹은 농업용 댐들에 의해 하류 하천의 유량이 완전히 또는 상당히 조절되고 있다. 이에 따라 하류 하천의 수질은 댐의 방류량에 따라 크게 변하며, 특히 하천유량이 적고 자정효율이 낮은 겨울의 하천수질은 상류 댐의 방류량에 크게 좌우된다(한국수자원공사, 1993).

하천의 장기유량과 그에 따르는 수질 예측은 하천 환경의 관리 및 운영측면에서 대단히 중요하나, 하천 수질의 예측은 물리적 과정의 불확실성과 입력자료에서 나타나는 불확실성 때문에 물리적인 모형을 구축하는데 비용과 시간적인 측면에서 상당히 어렵다. 즉, 물리화학적 모형에 의한 하천 수질의 모의는 그 속에 내재된 물리학적 자연현상을 시공간적으로 상세히 설명하여줄 수 있다는 점에서 유용하

나, 예를 들어 임의의 지점에서의 유량의 예측, 용수 공급량의 예측 등과 같이 입력과 출력 자료로 표현될 수 있는 단순한 문제에 관하여는 오히려 수집된 자료의 특성을 이용하는 시계열 모형이 선호될 수 있다.

이와 같이 시스템에서 출력계열이 한 개 이상의 입력계열에 의존한다면 단변량 Box-Jenkins 모형보다는 입력과 출력의 관계를 고려할 수 있는 다변량 통계모형을 적용하는 것이 더 바람직하다. 이러한 모형은 처음 수환경 분야에서는 강우량과 하천 유출량의 연간 변동을 분석하고 아울러 미래의 변화를 예측하는데 적용되기 시작하여 현재는 수문 자료뿐만 아니라 수질자료의 분석과 예측에도 널리 이용되고 있다(Lettenmaier et al., 1976; Szollosi-Nagy, 1976; Lohani et al., 1987; Jayawardena et al., 1989; 박 등, 1996).

본 연구에서는 단변량 예측모형인 ARMA 모형과 다변량 예측모형인 ARMAX 모형을 이용하여 팔당댐 하류부인 노량진 지점의 수질예측에 적용하였다. 또한, 두 모형의 비교를 통하여 단변량 모형과 다변량 모형의 적용성을 판단해 본 후, 다변량 모형인 ARMAX 모형을 이용하여 상류 댐의 수질 및 방류량과 하류 수질 사이의 상관특성 및 상류 댐 방류수의 조작을 통한 하류의 수질개선효과를 검토하고자 하였다.

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
 skim@gri.re.kr

## 2. ARMAX 모형

ARMAX모형(AutoRegressive Moving Average eXogenous model)은 ARMA모형에 증회귀모형의 특성을 결합시킨 선형 추계학적 예측방법으로서 선행지수인 투입변수와 종속변수간의 동적 관련성을 분석하여 모형의 예측 값을 개선시키고자 하는데 목적이 있다(Makridakis et al., 1983; 남, 1992; 양, 1992; 박 등, 1996).

기본적인 입출력 시계열을 각각  $u(t)$ ,  $y(t)$ 라 할 때, 모형의 일반적인 구조는 아래와 같다.

$$A(q)y(t) = B(q)u(t-nk) + C(q)e(t) \quad (1)$$

여기서  $q$ 는 이동(shift) 연산자이고,  $A(q)$ ,  $B(q)$ ,  $C(q)$ 는 아래와 같이 지체 연산자(lag operator)  $q^{-1}$ 로 나타내어지는 다항식이다.

$$\begin{aligned} A(q) &= 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_{na}q^{-na} \\ B(q) &= b_1 + b_2q^{-1} + \dots + b_{nb}q^{-nb+1} \\ C(q) &= 1 + c_2q^{-1} + \dots + b_{nc}q^{-nc} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,  $na$ 와  $nb$ ,  $nc$ 는 각각 다항식의 차수를 나타내며,  $nk$ 는 입력에서 출력까지의 지체를 나타낸다. 이를 전개하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} y(t) + a_1y(t-1) + \dots + a_{na}y(t-na) = \\ b_1u(t-nk) + b_2u(t-nk-1) + \dots + b_{nb}u(t-nk-nb+1) \\ + e(t) + c_1e(t-1) + \dots + c_{nc}e(t-nc) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,  $e(t)$ 는 분산 1인 백색잡음이다. 따라서 이와 같은 형식의 모형은 임의 개수의 입력을 가진 시스템에 대해서 아래와 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} A(q)y(t) &= B_1(q)u_1(t-nk_1) + \\ &\dots + B_n(q)u_n(t-nk_n) + C(q)e(t) \end{aligned} \quad (4)$$

또한, 본 연구의 경우와 같이 단변량 모형인 경우 모형 방정식은 아래와 같이 구성된다.

$$A(q)y(t) = C(q)e(t) \quad (5)$$

따라서 단변량 모형인 ARMA모형은 ARMAX모형의 특별한 경우라고 할 수 있다.

## 3. 모형의 적용

본 연구를 위한 대상지역으로 팔당댐 하류부를 선정하였다. 실제 한강 본류의 유량은 팔당댐 방류량과 지류 유입량의 합이라 할 수 있다. 그러나, 한강 본류의 물 수지를 보면 팔당댐 방류량에 비해 노량진 지점의 유량은 약 3% 정도 증가하므로(서울시정개발연구원, 1994), 본 연구에서는 장기적인 유량의 측면에서 팔당댐 방류량은 노량진 지점의 유량과 거의 같다고 보았다. 1985년부터 1993년까지의 9개년간의 팔당댐 월 방류량, 월 BOD와 COD농도, 노량진 지점의 월BOD와 COD농도를 Fig. 1에 나타내었다(환경부, 1988~1994). Fig. 1에서 NR, PD는 각각 노량진 및 팔당댐 지점을 나타낸 것이다. 이러한 수질항목은 다른 수질항목에 비해 하천의 오염도 평가에 주요한 인자로 고려되고 있으며, 이중 특히 BOD는 우리나라 하천오염도의 평가지표로 널리 사용된다. Fig. 1에서 볼 수 있듯이 팔당댐의 방류량은 7월과 8월에 가장 많으며, 10월부터 4월까지 갈수기의 평균 방류량은 약 250cms 정도이다. BOD와 COD 농도는 8월 및 9월에 가장 낮으며, 1월부터 5월까지 오염의 정도가 가장 심함을 알 수 있다. 이는 여름철에 강우량이 집중되는 우리나라 강수 특성에 따른 희석작용에 의해 여름철의 BOD가 낮게 나타나는 것으로 판단된다(한국수자원공사, 1993).

Fig. 1은 또한 사용된 자료들이 모두 12개월을 주기로 하

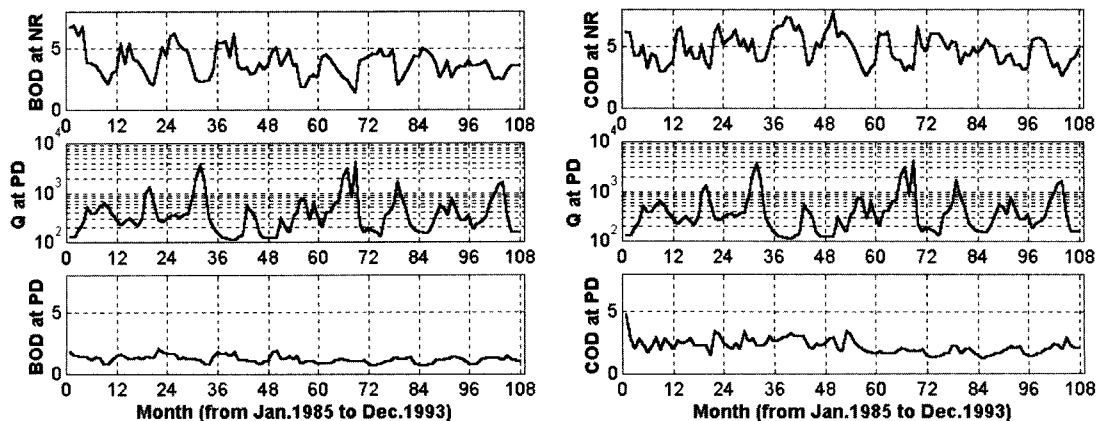


Fig. 1. Time series (1985-1993).

고 있으며, 시간적으로 서로 비슷한 시계열 패턴을 나타냄을 보여주고 있다. 정규화 변환을 위하여 팔당댐 및 노량진 지점 BOD 농도의 경우는 평방근(square root) 변환을, 팔당댐 지점 방류량의 경우는 대수(log) 변환을 각각 실시하였다. 팔당댐 및 노량진 지점의 COD 농도의 경우는 자료 자체가 충분히 정규분포를 따르고 있으므로 원 자료를 그대로 사용하였다. 그 후, 정규화 변환 자료의 주기성을

제거하기 위하여 변환된 자료에 대해 각 월의 평균을 뺀 후, 각 월 표준편차로 나누는 과정을 수행하였다. 또한, 사용된 자료의 경우 별다른 추세 성분은 없는 것으로 판단하였다.

이와 같이 전 처리된 자료들의 자기상관특성 및 교차상관특성을 Fig. 2와 3에 각각 나타내었다. Fig. 2에서 ACF는 자기상관함수(Autocorrelation function)를, PACF는 편자

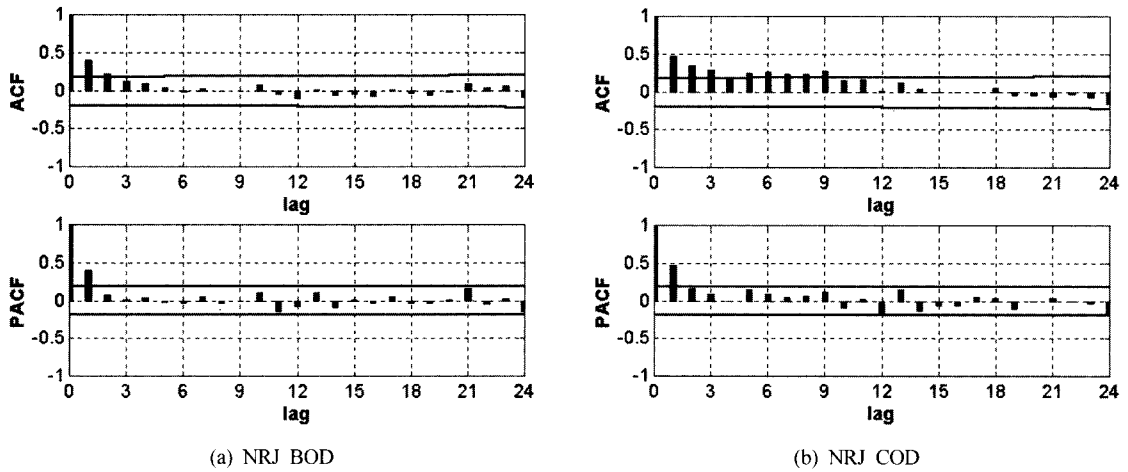


Fig. 2. Correlogram.

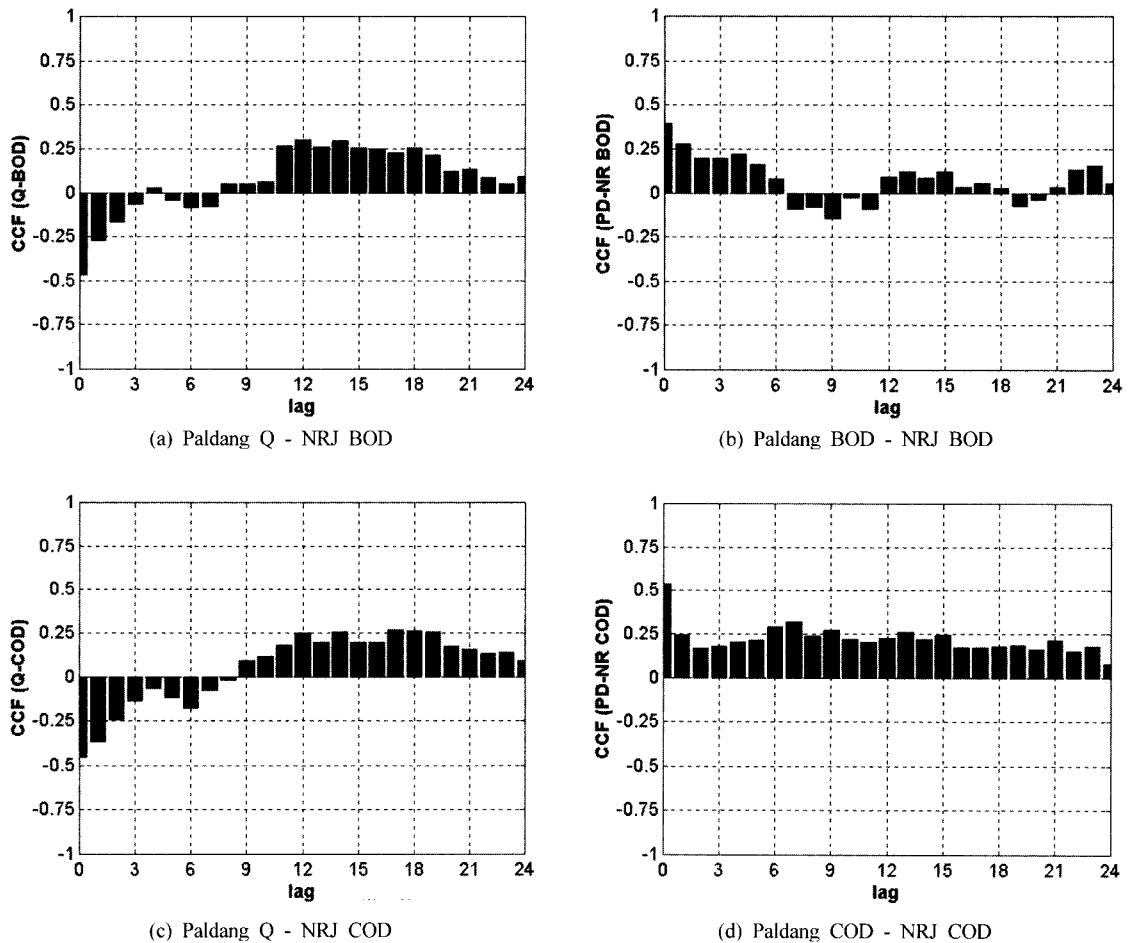


Fig. 3. Cross correlation.

Table 1. ARMAX model

ITEM	ARMAX model	Input data	
NR BOD	LB1	NR BOD	Univariate
	LB2	NR BOD PD Streamflow	Multivariate
	LB3	NR BOD PD BOD	Multivariate
	LB4	NR BOD PD Streamflow PD BOD	Multivariate
NR COD	LC1	NR COD	Univariate
	LC2	NR COD PD Streamflow	Multivariate
	LC3	NR COD PD COD	Multivariate
	LC4	NR COD PD Streamflow PD COD	Multivariate

기상관함수(Partial autocorrelation function)를 의미한다. 또한, Fig. 3에서 CCF는 교차상관함수(Cross correlation function)를 의미한다.

Fig. 2로부터 모형구성을 위한 AR 차수 및 MA 차수는 모두 1이면 충분할 것임을 알 수 있다. Fig. 3으로부터 입력자료와 출력자료 사이의 지체시간은 0이며, 따라서 해당 월의 오염물 농도는 해당 월의 상류 댐 방류량과 상류 오염물 농도와 관련이 있을 것으로 판단된다. BOD 농도의 경우는 상류 댐 방류량과의 상관관계(0.5이하)와 상류 BOD 농도와의 상관관계가 거의 비슷한 강도(0.5이하)를 갖고 있으나, COD의 경우는 상류 COD 농도와의 상관관계(0.5이상)가 상류 댐 방류량과의 상관관계(0.5이하)보다 더 큰 관련을 맺고 있다.

이러한 통계 특성을 고려하여 노량진 지점의 수질을 예측하기 위한 ARMAX모형을 Table 1과 같이 각 수질항목 별로 각각 4개의 모형으로 구축하였다.

## 4. 결과 및 분석

### 4.1. 각 모형의 예측 결과 및 분석

본 절에서는 3절에서 구축한 모형들을 사용하여 한강 본류에서의 월 BOD와 COD농도를 예측하였다. 먼저 1985~1991년 자료를 사용하여 모형의 모수를 추정한 후(본 연구에서 제안된 모형의 차수는 모두 1이다.), 1992~1993년 수질농도에 대해 1개월 전방 예측을 수행하였다(Fig. 4와 5). 또한, 각 예측 결과의 분석을 위해 아래의 기준을 통하여 각 모형의 오차를 산정하였으며, 이를 Table 2에 나타내었다.

$$PE = \frac{100}{T} \sum_{k=1}^T \left| \frac{\hat{y}(k) - y(k)}{y(k)} \right| \quad (6)$$

Table 2. Model results

Item	Model	RE	RMSE
BOD	LB1	13.76	0.62
	LB2	12.06	0.52
	LB3	11.92	0.52
	LB4	10.94	0.47
COD	LC1	13.39	0.63
	LC2	13.24	0.59
	LC3	10.98	0.50
	LC4	10.70	0.48

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{k=1}^T (\hat{y}(k) - y(k))^2} \quad (7)$$

여기서,  $T$ 는 예측된 자료의 수이며,  $\hat{y}$ 는 예측치,  $y$ 는 실측치이다.

Table 2에 나타난 바와 같이 목적수질별, 구성모형종류별로 식 (6)에 표시한 오차를 기준으로 할 때 대략 10~15%의 오차를 보이고 있으며, 단변량 시계열을 통한 예측보다는 다변량 시계열을 통한 예측이 보다 정도 높음을 알 수 있다. 이로부터 팔당댐 방류량 및 댐 수질이 노량진 수질을 모의하기 위한 입력자료로서 사용하는 것이 더 합리적인 방법이라고 볼 수 있으며, 예측의 정확도를 기준으로 할 때, 상류 댐 방류량을 입력으로 사용하는 것보다는 상류 댐 수질을 입력으로 사용하는 것이 보다 더 바람직할 것으로 판단된다.

### 4.2. 상류 댐 방류량 및 상류 수질개선 시 하류 수질개선효과 검토

시계열 모형을 이용한 상류 댐 방류량이 하류 수질에 미치는 영향을 분석하기 위하여 상류 댐 방류량이 입력자료인 LB2, LC2모형을 이용하여 1991년 12월 및 1992년 1월, 2월 팔당 댐 방류량을 10%에서 50%까지 10%씩 증가시켜가며 하류 수질농도의 변동양상을 예측 분석하였으며, 상류 수질이 하류 수질에 미치는 영향을 분석하기 위하여 상류 수질이 입력자료인 LB3, LC3모형을 이용하여 1991년 12월 및 1992년 1월, 2월 팔당 댐 수질을 10%에서 50%까지 10%씩 개선시켜가며 하류 수질농도의 변동양상을 예측 분석하였다. Fig. 6과 7에 이에 대한 결과를 도시하였다.

Table 2에서 알 수 있듯이 1개월 전방예측의 경우 예측 오차가 10~15%정도이므로 Fig. 6과 7의 상류 방류량 및 상류 수질개선이 하류수질개선에 미치는 효과를 정량적으로 제시하는 것은 무리가 있다고 판단된다. 그러나 Fig. 6과 7에서 알 수 있듯이 팔당댐 방류량의 단순 증가보다는 팔당댐의 수질 개선이 결합되었을 때 보다 효과적인 하류 수질개선이 이루어질 수 있는 것으로 보인다. 이는 팔당댐의 방류수질이 노량진 지점의 수질에 큰 영향을 미치고 있으며, 따라서 팔당댐의 수질개선 없이 방류수만을 증가시키

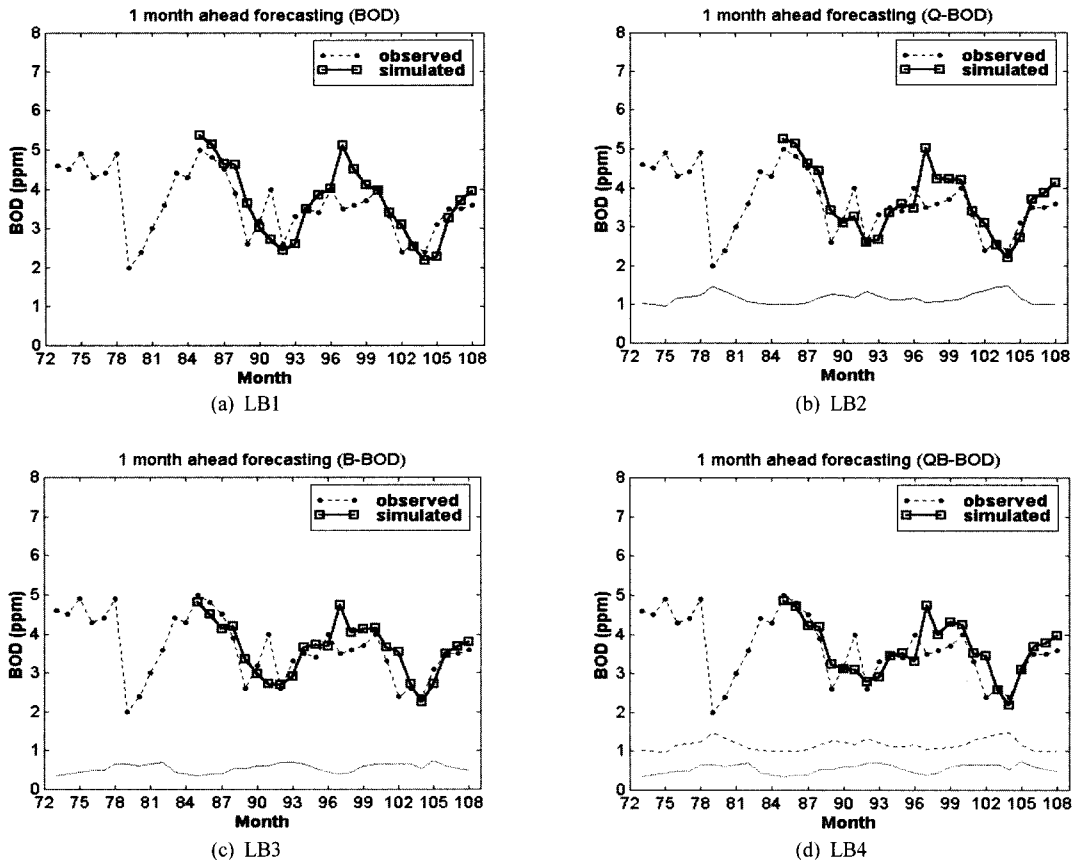


Fig. 4. BOD 1 month ahead forecasting.

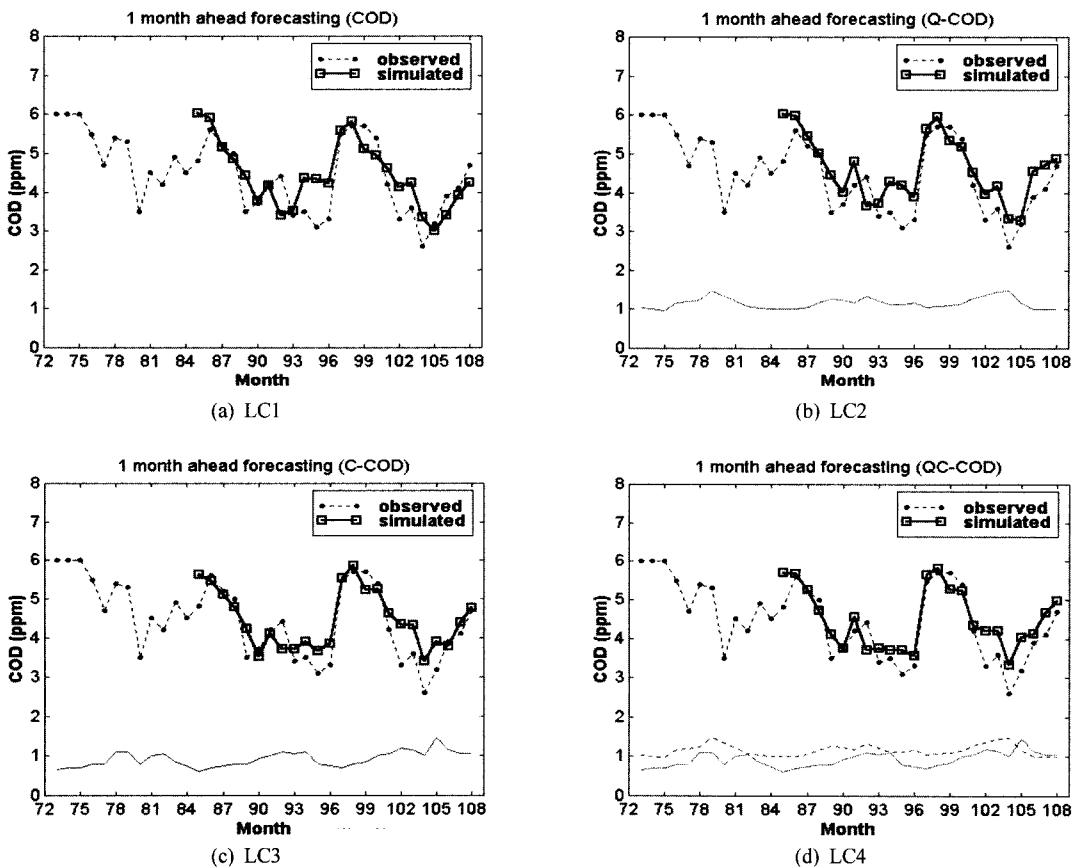
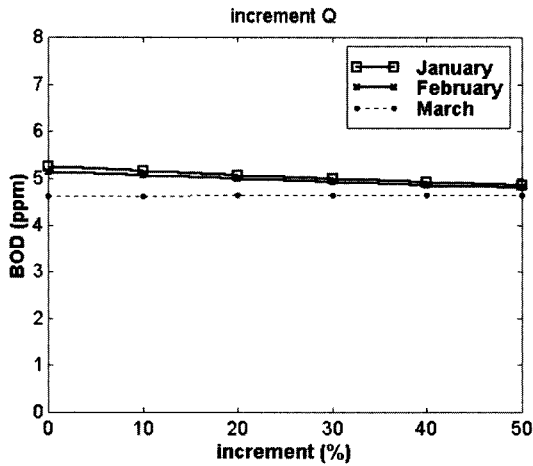
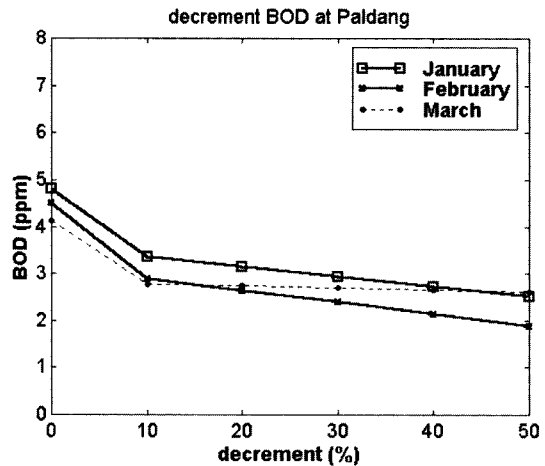


Fig. 5. COD 1 month ahead forecasting.

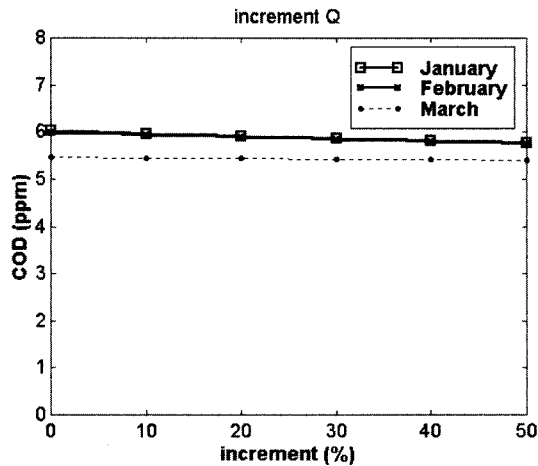


(a) Dam outflow operation

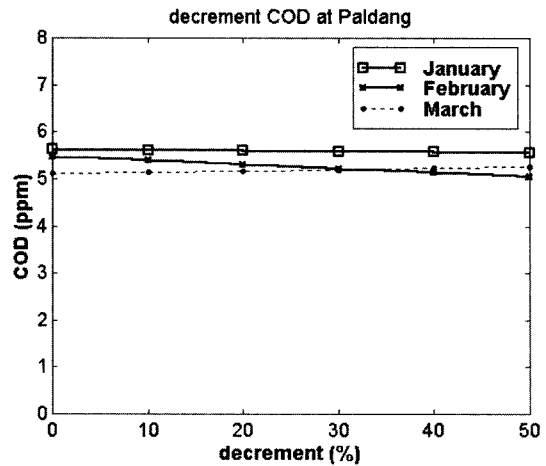


(b) Dam water quality improvement

Fig. 6. BOD water quality improvement.



(a) Dam outflow operation



(b) Dam water quality improvement

Fig. 7. COD water quality improvement.

는 것은 하류의 수질개선에 미치는 효과가 거의 없음을 보여주는 결과로 이해될 수 있다.

### 5. 결론

본 연구에서는 팔당댐 방류량 및 수질인자, 노량진 지점의 수질인자를 사용하여 선형 시계열모형인 ARMAX모형의 예측결과 분석을 수행하였고, 이를 통하여 상류 댐 방류량 및 상류 수질이 하류수질에 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결과는 다음과 같다.

1. ARMAX모형을 이용하여 노량진 지점의 수질을 1개월 전방 예측한 결과 BOD와 COD 모두 15% 이하의 오차로 예측 가능함을 알 수 있었다.
2. 제안된 모형의 예측정확도를 기준으로 볼 때, 하류 수질 예측을 위한 입력자료는 상류 댐 방류량보다는 상류 댐 수질이 더 적절할 것으로 보인다. 이는 역으로 상류 수질이 상류 방류량보다 하류 수질에 미치는 영향이 더 크다는 것으로 이해될 수 있다.

3. 팔당댐 방류량 증가 및 수질개선으로 인한 노량진 지점의 수질개선효과를 분석한 결과 상류 수질의 개선 없이 방류량만을 단순 증가하는 것으로는 하류의 수질개선에 별다른 효과를 기대할 수 없는 것으로 판단된다. 즉, 수질오염이 심각한 주요 갈수기 때 하류 수질의 개선 목적으로 상류 댐 방류량을 단순히 증가시키기보다는 상류의 수질개선이 결합되어야만 보다 효과적인 하류 수질개선이 이루어 질 수 있는 것으로 보인다.

그러나 본 연구에서 수집·사용된 유량자료와 수질자료는 상당한 불확실성을 내포하고 있을 것으로 판단되며, 이는 가용한 수질자료가 한 달에 몇 번 관측하여 월 평균값으로 상류 방류량 및 상류 수질과 하류 수질의 정확한 대응자료를 만들 수 없었기에 기인한다. 이러한 점에서 기본적으로 본 연구의 결과는 이용된 자료의 신뢰도 문제를 안고 있으며, 또한 하천오염 유입물의 중요한 원인 중 하나인 선행강우의 유무 등이 고려되지 못한 점 등은 이후 모형에 추가시켜야 할 사항으로 판단된다.

## 참고문헌

- 남기석, 변형된 ARIMA모형을 사용한 한국의 추가분석, 연세대학교 석사학위논문 (1992).
- 박석순, 정대영, 윤용운, 김범철, 박스-젠킨스법을 이용한 소양호 수질변화 시계열분석, *대한환경공학회 논문집*, **18**(6), pp. 767-780 (1996)
- 서울시정개발연구원, 한강 수질관리 효율화 방안 연구 (1994).
- 양현조, 전이함수모형과 상태공간모형의 비교연구, 연세대학교 석사학위논문 (1992).
- 한국수자원공사, 댐 방류량이 하천수질에 미치는 영향에 관한 연구 (1993).
- 환경부, 한국환경연감 (1988-1994).
- Jayawardena, A. W. and Lai, F., Time Series Analysis of Water Quality Data in Pearl River China, *J. Environ. Eng. Div., ASCE*, **155**(3), pp. 590-606 (1989).
- Lettenmaier, D. P., and S. J. Burges, Use of State Estimation Techniques in Water Resource System Modeling, *Water Resources Bull.*, **12**(1), pp. 83-99 (1976).
- Lohani, B. N. and Wang, M. M., Water Quality Data Analysis in Chung Kang river, *J. Environ. Eng. Div., ASCE*, **113**(1), pp. 186-194 (1987).
- Makridakis, S., and Wheelwright, W. C., *Forecasting Methods for Management*, New York, Wiley (1983).
- Szollosi-Nagy, A., An Adaptive Identification and Prediction Algorithm for the Real Time Forecasting of Hydrologic Time Series, *Hydrological Science Bull.*, **21**(3), pp. 163-176 (1976).