

## 한강하류부 수질의 통계학적 해석

### Statistical Analysis of Water Quality in the Downstream of the Han River

백 경 원\* · 정 용 태\*\* · 한 건 연\*\*\* · 송 재 우\*\*\*\*

Baek, Kyung Won · Chung, Yong Tai · Han, Kun Yeun · Song, Jai Woo

---

#### Abstract

The characteristics of water quality in the downstream of the Han River were analyzed by statistical techniques. Basic characteristics, areal and temporal variations, and correlations of water quality data were investigated. Monthly water quality data have been investigated systematically by exploring data analysis, including time series plot, summary statistics, distribution test, time dependence test, seasonality test and flow relatedness test. Results show that water quality data in this river have seasonality. And applicability of stochastic models such as Thomas-Fiering model and ARMA(1,1) model was identified. From the examination of water quality data related to discharge, it was found that DO and SS are sensitive to water temperature rather than discharge, while BOD and COD are sensitive to discharge at dry seasons. Seasonal periodicities were identified in all water quality variables from the cross correlation analysis.

---

#### 요 지

한강하류부 수질의 통계학적 해석을 통하여 수질 시계열자료의 기본 통계특성치, 지점별 및 계절별 변동성을 검토하였으며, 유량과 수질인자간의 상관성 분석을 실시하였다. 본류의 주요 6개 지점 및 3개 지류에 대한 통계특성치와 적정분포형을 산정하여 제시하였으며, 시간 의존성 및 계절성을 검토하여 제시하였다. 또한, 수질 항목간의 상관성 검토를 통하여 상관성이 높은 수질 항목간, 그리고 지점간의 상관성을 제시하였다. 추계학적 모의모형의 적용가능성을 확인하였으며, DO 항목은 전 지점간에 높은 상관성을 가지고 있었다. 유량과의 상관관계 검토에 있어서 DO, SS 항목은 유량보다는 수온에 민감하였으며, BOD, COD 항목은 유량이 적은 갈수기에는 유량에 민감한 것으로 나타났다. 수온에 밀접한 영향을 받는 DO 항목 외에도 BOD, COD 항목은 계절적인 주기성을 가지고 있었으며, 상호상관 분석결과 DO,

- 
- \* 시설안전기술공단 기술지원단 과장
  - \*\* 순천전문대학 환경관리과 조교수
  - \*\*\* 경북대학교 공과대학 토목공학과 교수
  - \*\*\*\* 홍익대학교 공과대학 토목공학과 교수

BOD, COD 항목 외의 수질 항목들에서도 각 수질 항목들에 내재된 주기성을 찾아볼 수 있었다.

## 1. 서 론

경제개발에 따른 산업화 및 인구의 도시집중 현상은 하천의 수질오염을 악화시켜 왔으나 지난 수십년간 하천은 치수면에서의 개발 및 관리에 치우쳐 오염문제가 도외시되어 왔다. 그러나 수질오염의 문제는 오염이 상당히 진행된 후에야 심각성을 나타내게 되며, 한 지역 및 지류에서의 오염은 하천 하류부에 영향을 미치게 되므로 이에 대한 대책이 중요한 사회문제로 대두되고 있다.

하천수의 정성, 정량적인 분석을 위해서는 여러 통계학적 기법이 사용되고 있으며 이러한 기법을 현재 기본적인 통계학적 검정이 수행되지 않은 국내 하천의 수질자료에 적용하면 임의 지점의 수질 특성 및 영향인자를 파악할 수 있게 되어 장래 수질변동의 특성을 확률론적 이론에 의해 예측하는 것이 가능할 것이다.

수질변화에 대한 추계학적 분석을 이용한 연구로서 Thomann(1976)은 수질자료의 시계열에 spectral 분석을 이용하여 일별 수온과 용존산소의 변동을 조사하였으며, Hahn(1972)은 spectral 분석으로 일별 수질변동의 주기성을 조사하였다. Mehta 등(1975)은 유량, 수온, BOD 및 용존산소의 일별자료를 ARIMA 모형을 이용하여 추계학적 분석을 시도하였다.

국내에서의 수질자료에 대한 시계열분석으로 황임구와 윤태훈(1981)은 유량과 각 수질인자의 통계적 특성 및 상관관계를 조사하기 위하여 한강하류부 인도교 지점에 대하여 자기 및 상호상관함수, power spectrum 등을 적용한 바 있으며, 이흥근(1982)은 한강하류부의 수질변동에 대한 추계학적 특성을 분석하였다.

본 연구의 목적은 한강 하류부에서 통계학적 방법을 적용하여 효율적인 수질해석을 실시함으로써 수질관리를 위한 기초자료를 제공하고자 함에 있

다.

연구 대상구간은 수도권 지역의 상수원으로 적정 수질의 확보가 중요한 관심사가 되고 있는 한강하류부의 팔당댐-한강대교 구간이며, 사용한 수질자료는 한국환경연감(환경부)에 수록된 상시측정망 자료(1985-1994)중 팔당, 구리, 구의, 뚝도, 보광, 노량진 지점의 수질자료이다. 유량과의 상관성 분석을 위해 유량과 수질자료를 동시에 확보할 수 있는 지점인 팔당, 구의, 노량진 지점을 택하여 해석하였다. 이를 위하여 수질자료에 대한 시계열 분석, 적정 분포형의 검정, 시간의존 및 계절적 변동 특성 해석, 그리고 수질인자와 유량, 수질인자들간의 상관성 해석을 실시하여 향후 추계학적 해석을 위한 입력자료로 이용될 수 있도록 하였다. 계열상관계를 분석하여 수질자료의 시간의존성 및 계절성 등을 검토하였으며, 이를 기초로 추계학적 모의 발생 모형을 이용한 장래 수질모의를 시행하였다. 또한 회귀분석 및 상호상관분석을 통하여 각 수질 항목들간의 관계와 유량과의 상관성 및 지점간 수질 항목의 상관관계를 검토하였다.

## 2. 통계학적 수질해석기법

### 2.1 수질자료의 시계열 해석

하천의 한 지점에서 특정 오염물질을 반복해서 관측한 자료는 시계열을 형성하게 되며 이는 시간의존성, 주기적 변동성 혹은 무작위성과 같은 특성을 가지게 된다.

일반적으로 시계열은 경향성분(trend component), 주기성분(periodic or cyclic component), 그리고 무작위성분(random component)의 세가지 성분의 합으로 고려될 수 있으며, 하천수질은 명백히 시간에 따라 변화하며 비확정론적인 것이고, 어느 일정한 시간에 대해 정확히 예측할 수 없는 값, 즉 추계학적 변수이다. 이러한 문제에 대한

합리적인 접근방법은 수질의 추계학적 변동성을 고려하고 이 개념을 수질기준과 결합시키는 것으로서, 지류유입수의 수량과 수질, 유량조절 등에 따른 수질변화에 대한 영향의 신뢰성 있는 평가를 하는 것이 필요한 것이다.

## 2.2 수질자료의 시간적 변동성

수질자료에서 시간에 의존하는 특성은 시간의존성(time dependence) 및 주기 변동성(cyclic variation)이다. 시간의 변화에 대한 불규칙적인 현상의 해석을 위한 통계적 수단인 계열 및 상호상관함수(serial and cross correlation function)를 구함으로써 각 시계열의 통계적 특성 및 상호관계를 파악할 수 있으며, 계열상관계수를 시간 지체  $k$ 에 대해 도시하는 계열상관도(serial correlogram) 및 상호상관도(cross correlogram)으로부터 시계열의 주기성 혹은 계절적 변동성을 관찰할 수 있다.

## 2.3 추계학적 모의모형

월자료나 계절자료 등의 추계학적 모의를 실시할 경우에는 1차 자기회귀(autoregressive)형의 모형이 많이 사용되며 가장 대표적인 Thomas-Fiering 모형의 기본이론은 다음과 같다.

12개월의 가용관측자료에서  $j$ 월의 자료가  $j+1$ 월의 자료와 회귀분석되어 12개의 회귀방정식을 이루게 되며 모의발생방정식은 다음과 같다.

$$x_{ij} = \bar{x}_j + \gamma_j \frac{s_j}{s_{j-1}} (x_{i, j-1} - \bar{x}_{j-1}) + z_j s_j \sqrt{1 - \gamma_j^2} \quad (1)$$

여기서,  $x_{ij}$ 는  $i$ 년  $j$ 월의 모의발생자료,  $\bar{x}_j$ 는  $j$ 월의 평균치,  $r_j$ 는  $j$ 월과  $(j-1)$ 월 자료간의 계열상관계수이며,  $s_j, s_{j-1}$ 는 각각  $j$ 월 및  $(j-1)$ 월 자료의 표준편차,  $z_j$ 는 표준정규난수,  $N(0,1)$ 이다.

월 자료와 같은 계절주기를 가지는 자료의 모의발생에 사용할 수 있는 또 다른 모형으로는 ARMA(AutoRegressive Moving Average) 모형이 있으며, ARMA(1,1) 모형의 일반형은 식

(2)와 같다.

$$Z_t = \theta_1 Z_{t-1} + e_t - \theta_1 e_{t-1} \quad (2)$$

여기서  $Z_t$ 는 표준화(standardization)된 시계열로서 평균치가 0이고 분산이  $\sigma_z^2$ 인 계열이다.

식 (2)의  $\theta_1$ 과  $\theta_1$ 은 각각 자기회귀계수 및 이동평균계수이며,  $e_t$ 는 평균치가 0이고 분산이  $\sigma_e^2$ 인 추계성분계열이다.

$$e_t = \sigma_e z_t \quad (3)$$

여기서,  $z_t$ 는 표준정규난수(standard normal random variable)이며, 계절주기를 가질 경우 시간  $t$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$t = (v-1)\omega + \tau \quad (4)$$

여기서,  $v$ 는 년도를,  $\tau$ 는 계절(1, 2, 3, ...,  $\omega$ )을 나타낸다.

이 모형을 적용하기 위해서는 먼저 매개변수  $\theta_1$ 과  $\theta_1$ 을 결정해야 하며 식 (5), (6)과 같은 Yule-Walker 방정식으로부터 추정한다(Kottegoda, 1980).

$$\gamma_2 = \gamma_1 \hat{\theta}_1 \quad (5)$$

$$\gamma_1 = \frac{(1 - \hat{\theta}_1 \hat{\theta}_1)(\hat{\theta}_1 - \hat{\theta}_1)}{1 + \hat{\theta}_1^2 - 2\hat{\theta}_1 \hat{\theta}_1} \quad (6)$$

추계성분계열  $e_t = \sigma_e z_t$ 이므로 식 (2)는 식 (7)과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} Z_t &= \theta_1 Z_{t-1} + \sigma_e z_t - \theta_1 \sigma_e z_{t-1} \\ &= \theta_1 Z_{t-1} + \sigma_e (z_t - \theta_1 z_{t-1}) \\ &= \theta_1 Z_{t-1} + S_2 \sqrt{1 - \gamma_1^2} (z_t - \theta_1 z_{t-1}) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서,  $S_2$ 는 자료계열의 표준편차이다.

## 2.4 유량 및 수질 항목간의 상관성

하천내 특정 지점에서의 수질은 각 지점에서의 유량, 농도, 수질 항목들간의 반응에 의하여 물질 이동 및 변화가 일어나며 유량과 유입 오염부하량에 의한 영향이 가장 크다.

각 지점에서의 유량과 유입부하량 및 하수처리 정도에 따라 지점간 수질 항목들 사이에 상관관계를 가지게 될 것이며, 또한 상류의 한 지점에서 이상수질이 발생하였을 경우 하류의 지점에 어떤 영향이 있을 것인가를 파악하고자 하는 경우 특정 수질 항목에 대한 지점간 상관관계의 분석결과가 필요할 것이다.

하천 수질 항목은 계절적 변동성에 따른 주기성을 가지고 있을 것이며, 상호상관분석(cross correlation analysis)을 적용하여 시간지체에 따른 각 항목간의 상관관계 및 주기성을 검토하는 것이 가능할 것이다.

평균이  $E(X)$ ,  $E(Y)$ 이고 분산이  $\text{var}(X)$ ,  $\text{var}(Y)$ 인 두 시계열  $X(t)$ ,  $Y(t)$ 가 시간지체  $k$ 에 대하여 상관관계를 가진다면, 지체  $k$ 에 대한 두 계열의 상호상관함수(cross correlation function)는 식 (8)과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} \rho_{xy}(k) &= \frac{\text{cov}\{X(t), Y(t+k)\}}{\{\text{var}(X) \text{var}(Y)\}} \\ &= \frac{\{X(t) - E(X)\}\{Y(t+k) - E(Y)\}}{\{\text{var}(X) \text{var}(Y)\}^{1/2}} \quad (8) \end{aligned}$$

여기서,  $\text{cov}\{X(t), Y(t+k)\}$ 는  $X(t)$ ,  $Y(t+k)$ 의 계열공분산이다.

따라서 평균이 각각  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$ 인 표본자료계열  $x_t$ ,  $y_t$ 에 대한 상호상관계수는 식 (9)와 같이 쓸 수 있다.

$$\gamma_{xy}(k) = \frac{\left\{ \sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x})(y_{t+k} - \bar{y}) \right\}}{\left[ \left\{ \sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})^2 \right\} \left\{ \sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y})^2 \right\} \right]^{1/2}} \quad (9)$$

$k=0$  인 경우는 두 변수에 대한 일반적인 상관계수가 되며, 음의 지체에 대한 상호상관계수는 양의 지체에 대한 계수  $r_{yx}(k)$ 와 동일하게 된다.

## 3. 시계열 해석

### 3.1 월 수질자료의 통계특성

연구 대상구간 중 본류의 6개 지점 및 왕숙천, 탄천, 중랑천 등 유입 지류의 월 수온, DO, BOD 자료를 대상으로 통계특성치들을 산정하였으며, 취득 가능한 자료의 제한성으로 인하여 과거 10개년 간의 자료를 대상으로 하였다.

항목별로 월별 변동성향을 살펴 보면, 수온의 경우 상류부인 팔당에서 1.3-25.3℃의 범위를 보였으며, 하류부인 노량진에서는 2.4-24.9℃의 범위로서 연중 편동폭은 크나 상하류간에 큰 편차를 보이지 않았다. DO 항목의 경우에는 팔당, 구의, 노량진의 세 지점에서 각각 8.35-13.14mg/l, 7.95-13.10mg/l, 6.88-11.01mg/l의 분포로서 연중 월별 변동폭이 크며, 하절기인 6-9월에 가장 낮은 농도치를 나타냈고 동절기인 2월에 최고 농도치를 보였다. 유량이 많은 하절기에는 수온이 상승함에 따라 DO의 농도가 감소하는 계절적인 영향에 의해 하절기의 DO농도가 갈수기인 동절기에 비해 오히려 감소하는 경향을 보였다. 표준편차는 전체적으로 0.5-2.1의 변화를 보였으며 하류로 내려올수록 편차가 커지는 양상을 보여 하류부가 DO농도의 연간 변동폭이 큼을 알 수 있었다.

BOD 항목의 경우는 1월-4월에 높은 농도를 보였고 8-11월에 낮은 농도치를 보였으며, 월별 변동폭은 팔당, 구의, 노량진 등 세 지점에서 각각 1.05-1.33mg/l, 1.16-2.23mg/l, 2.07-5.18mg/l의 분포로서 DO 항목에 비해 연중 변동폭이 작음을 알 수 있었다. 표준편차는 DO 항목의 경우와 마찬가지로 팔당에서 하류부로 갈수록 커지는 양상을 나타냈다.

### 3.2 적정 확률분포형의 도출

적정 확률분포형의 도출을 위한 적합도 검정을

위해서 K-S(Kolmogorov-Smirnov) 검정법을 적용하였다. 본류의 6개 지점 및 유입 지류의 과거 10개년간 월 수온, DO, BOD 자료에 대하여 정규분포, 2변수 대수정규분포, 2변수 Gamma분포의 3가지 확률분포형을 대상으로 적합도 검정을 실시하였다. 지점별 BOD 항목의 적정분포형으로 산정된 결과는 표 1과 같다.

수온의 경우, 전 자료에 대해서는 모든 지점에서 정규분포가 적정 분포형으로 산정되었으며, 월별 자료에 대해서는 뚜렷한 적정 분포형을 얻을 수 없었다. DO 항목은 월별자료의 경우, 팔당 지점을 제외한 모든 지점에서 정규분포가 지배적인 확률분포

포의 특성을 보였으며, 전 자료는 지점별로 다른 적정 분포형을 가졌다. BOD 항목은 월별로는 모든 지점이, 그리고 전 자료에 대해서는 팔당 지점을 제외한 모든 지점이 대수정규분포형이 지배적인 확률분포형으로 나타나 세 항목중 가장 뚜렷한 분포형의 성향을 보였다. 세 항목 모두 분포형에 있어서의 계절적인 특별한 경향은 찾아 볼 수 없었다.

### 3.3 시간의존성 및 계절성 검토

시간의존성의 검토를 위해서 Exact Test를 사용하였다(윤용남, 1996). 연구대상 구간의 6개 수

표 1. 지점별 월 수질자료의 적정 확률분포형(BOD)

구 분	본 류						지 류		
	팔 당	구 리	구 의	뚝 도	보 광	노량진	왕숙천	탄 천	중랑천
1월	GAM2	LN-2	GAM2	LN-2	LN-2	LN-2	GAM2	LN-2	GAM2
2월	LN-2	GAM2	LN-2	GAM2	LN-2	GAM2	GAM2	LN-2	LN-2
3월	LN-2	GAM2	GAM2	GAM2	GAM2	LN-2	GAM2	LN-2	GAM2
4월	LN-2	LN-2	NORM	LN-2	LN-2	GAM2	GAM2	LN-2	LN-2
5월	LN-2	LN-2	LN-2	LN-2	LN-2	LN-2	NORM	LN-2	LN-2
6월	NORM	LN-2	NORM	LN-2	GAM2	LN-2	LN-2	LN-2	NORM
7월	LN-2	LN-2	GAM2	LN-2	GAM2	LN-2	LN-2	GAM2	GAM2
8월	LN-2	LN-2	LN-2	LN-2	NORM	GAM2	LN-2	LN-2	LN-2
9월	LN-2	LN-2	LN-2	LN-2	LN-2	NORM	GAM2	LN-2	LN-2
10월	GAM2	LN-2	NORM	LN-2	NORM	LN-2	LN-2	GAM2	LN-2
11월	LN-2	NORM	LN-2	GAM2	GAM2	LN-2	LN-2	LN-2	NORM
12월	GAM2	GAM2	GAM2	NORM	LN-2	LN-2	LN-2	LN-2	LN-2
전자료	GAM2	LN-2	LN-2	LN-2	LN-2	LN-2	LN-2	LN-2	LN-2

주) NORM: 정규분포

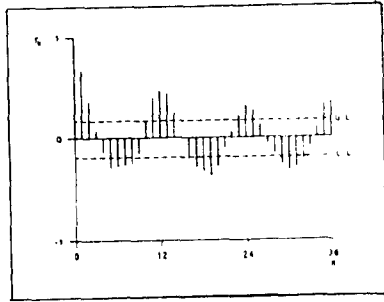
LN-2: 2변수 대수정규분포

GAM2: 2변수 Gamma분포

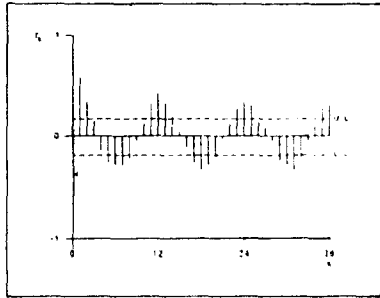
표 2. 월 수질 시계열자료의 1차계열상관계수

	TEMP.	pH	DO	BOD	COD	SS	E-Coli.
팔 당	0.804	0.508	0.751	0.473	0.593	0.616	0.446
구 리	0.799	0.496	0.691	0.281	0.217	0.033*	0.138
구 의	0.795	0.552	0.714	0.438	0.270	0.237	0.234
뚝 도	0.800	0.462	0.545	0.607	0.472	0.497	0.032*
보 광	0.796	0.448	0.581	0.489	0.454	0.447	0.091*
노량진	0.820	0.538	0.667	0.585	0.537	0.642	0.330

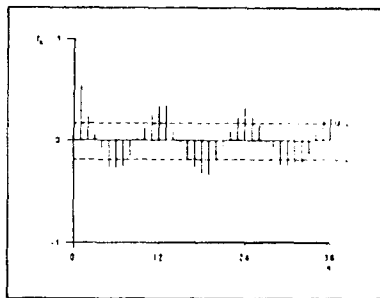
주) \* random time series



(a) DO



(b) BOD



(c) COD

그림 1. 수질 항목별 계절상관도(노량진 지점)

질측정지점에 대한 각 월 수질 항목들의 지속성 (persistence) 존재 확인을 위한 Exact Test 결과, SS와 E-Coli. 항목의 일부 지점을 제외한 나머지 항목들이 전 지점에서 지속성이 존재하는 시계열 (non-random time series)로 판명되었으며, 표 2는 각각의 1차 계절상관계수를 정리한 것이다. Exact Test에서 95% 신뢰구간에서의 상한치와 하한치는 각각 0.170과 -0.187이었다.

각 수질 항목들이 가지는 일반적인 지속성의 경향은 최상류인 팔당댐 지점에서 강한 지속성을 나타내고 하류로 내려오며 따라 약해지다가 다시 최하류인 노량진 지점에서 지속성을 회복하는 경향이 있는 것을 알 수 있으며, 이는 왕숙천, 탄천, 중랑천 등의 유입에 의한 영향으로 사료된다.

계절상관도로부터 월 수질자료와 같이 계절주기를 가지는 시계열일 경우 계절적 변동성을 관찰할 수 있다.

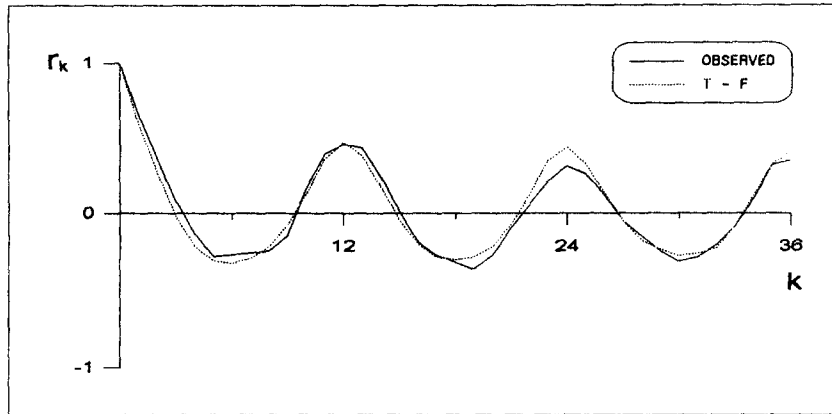
그림 1은 노량진 지점 6개 수질 항목중 계절적인 주기성을 보여 주고 있는 DO, BOD, COD 항목의 계절상관도이며, pH, SS, E-Coli. 등의 항목은 시계열의 지속성은 가지고 있으나 뚜렷한 주기성은 찾아 볼 수 없었다.

### 3.4 추계학적 모의모형의 적용

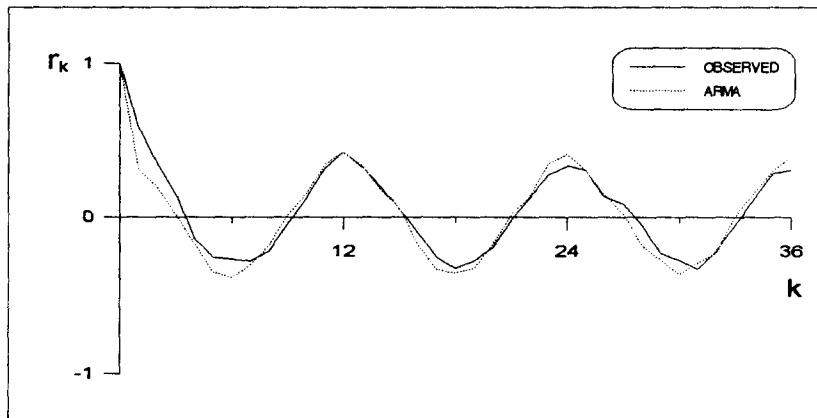
월 수질자료의 분석에서 시간의존성과 주기성을 강하게 나타낸 DO 항목과 BOD 항목에 대해 계절자료의 모의발생 모형을 이용한 모의를 실시하였다. 과거 노량진 지점에서의 10개년간 월 자료를 기초로 하여 100년간의 장기간 자료를 모의발생시켰다.

그림 2는 Thomas-Fiering 모형 및 ARMA(1, 1) 계절모형에 의한 모의발생자료의 계절상관도를 관측자료와 비교한 것이다.

두 모형에 의한 모의자료는 관측자료의 통계특성을 대체적으로 잘 반영해 주고 있으며 DO 항목은 Thomas-Fiering 모형이, BOD 항목은 ARMA(1, 1) 모형이 더 관측자료에 가까운 값을 보여 주고 있었다. 계절상관도에서 볼 수 있는 것처럼 계절상관계수의 크기 및 계절적인 주기성이 관측자료와 거의 일치하고 있다. 이로부터 Thomas-Fiering



(a) Thomas-Fiering 모형(DO, 노랑진)



(b) ARMA(1,1) 모형(BOD, 노랑진)

그림 2. 모의발생자료의 계절상관도

모형과 ARMA(1,1) 계절모형은 월 수질자료의 장기간 모의발생에 적용이 가능한 모형임을 확인할 수 있었다.

#### 4. 수질자료의 상관성분석

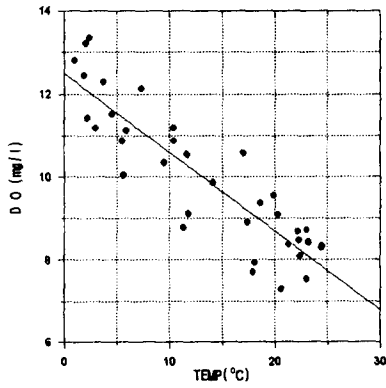
##### 4.1 유량과 수질 항목의 상관성

본 연구에 사용된 유량자료는 팔당댐, 광장 및 인도교지점의 자료로서 한국수문조사연보(1987-1993)에 수록된 팔당댐 방류량자료와 인도교, 광

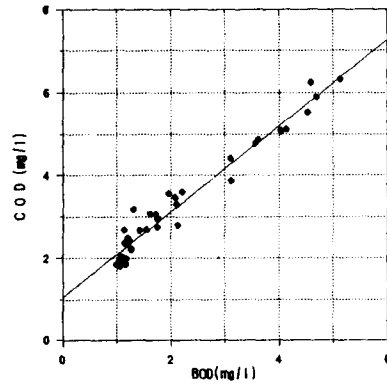
장 수위관측소의 수위자료를 이용하였다. 수위관측소 지점의 자료는 기 발표된 수위-유량곡선을 이용하여 산정하였으며, 수질자료는 월 자료로 구성되어 있으므로 일관성 있는 분석을 위해 일 유량을 산정한 후 각 월의 평균유량을 산정하였다.

##### 4.1.1 수질 항목간 상관성분석

6개 수질 항목에 대하여 상관분석을 한 결과 수온과 DO 항목, 그리고 BOD와 COD 항목간에 높은 상관성을 보였다. 이는 하천에서 수온과 DO의 경우 월간 수온변화에 따른 DO의 포화농도 변동

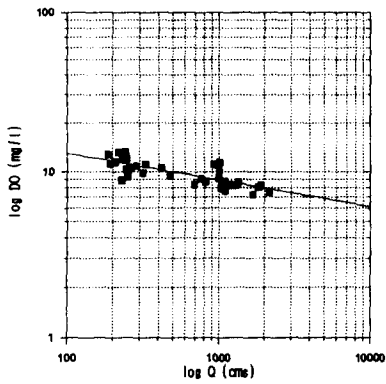


(a) TEMP-DO

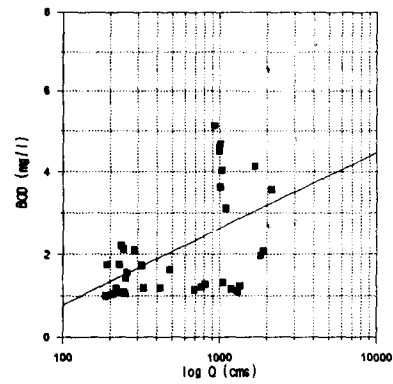


(b) BOD-COD

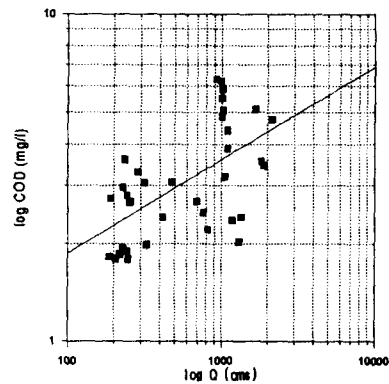
그림 3. 수질 항목들간의 상관도



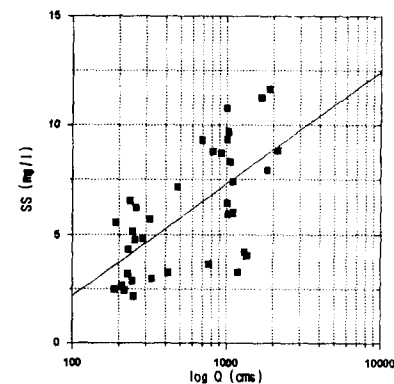
(a) Q-DO



(b) Q-BOD



(c) Q-COD



(d) Q-SS

그림 4. 유량과 수질 항목들의 상관도



에 기인하고 있으며, BOD와 COD의 경우 오염정도의 대표적인 매개변수로서 나타나 있기 때문에 예견할 수 있는 결과이고, 나머지 항목들간에는 상관성은 보이지 않았다.

식 (10)과 식 (11)은 위 두 항목들간의 상관식이며 그림 3은 상관도이다.

$$DO = 12.46 - 0.19 \cdot TEMP (r = -0.889) \quad (10)$$

$$COD = 1.06 + 1.03 \cdot BOD (r = 0.978) \quad (11)$$

#### 4.1.2 유량과 수질 항목과의 상관성분석

유량과 수질 항목들에 대하여 각 종속변수와 독립변수에 정규치와 대수치를 취하여 회귀분석을 실시하였다. 유량은 각 수질 항목에 비해 상대적으로 변동폭이 크기때문에 유량에 대수치를 취한 결과가 상관성이 좋은 것으로 나타났다. 식 (12)-(15)는 각각 DO, BOD, COD, SS 항목의 유량과의 상관식이며 그림 4는 상관도를 보이고 있다.

$$DO = 27.75 \cdot Q^{-0.16} \quad (r = -0.766) \quad (12)$$

$$BOD = -2.91 + 0.80 \cdot \text{Log } Q \quad (r = 0.502) \quad (13)$$

$$COD = 0.51 \cdot Q^{0.28} \quad (r = 0.585) \quad (14)$$

$$SS = -8.06 + 2.23 \cdot \text{Log } Q \quad (r = 0.650) \quad (15)$$

분석 결과, 유량과 각 수질 항목들간에 0.5이상의 상관계수값을 보이고 있지만 DO 항목의 경우 수온에 크게 영향을 받으므로 각 월별 상관성도 검토해 보았다.

월별로 수온은 변동폭이 크므로 온도에 의한 수질 인자의 영향을 줄일 수 있는 월별 분석을 한 경우 표 3에서 볼 수 있는 바와 같이 유량과 DO 항목은 상관성이 없는 것으로 나타났다.

월 평균치들간의 분석결과에서는 유량과 DO 항목이 상관성을 가지고 있으나 이는 계절적 요인에 따른 수온의 영향을 받은 것으로 DO 항목과 수온과의 밀접한 관계를 확인할 수 있으며, 따라서 DO의 농도가 유량의 크기에는 거의 지배를 받지 않는

것으로 판단된다.

BOD, COD, SS 항목의 경우를 보면 SS 항목 역시 DO 항목과 마찬가지로 월별 분석에서는 상관성이 낮아 계절적 요인이 작용하는 것으로 보이며, BOD와 COD 항목은 월별 상관성의 편차가 크고 일부 월의 경우 전체자료의 분석결과보다 훨씬 높은 상관성을 보이는 것으로 나타나 수온보다는 유량의 영향에 더 민감한 것으로 판단된다. BOD 항목은 1, 2, 3, 10, 11, 12월에, 그리고 COD 항목은 1, 2, 11, 12월에 각각 높은 상관성을 보였으며 유량의 변동폭이 큰 계절보다는 갈수기에 더 민감한 것을 알 수 있었다.

위의 분석결과에서 알 수 있는 것처럼 유량과 수질 항목간 월 자료의 상관분석은 계절적 요인에 따른 수온 등의 영향에 의한 결과가 초래되므로 수온의 변동이 없는 상태에서의 자료, 즉 일자료나 시자료 등의 분석이 효율적일 것으로 판단된다. 또한 팔당댐의 방류량에 따른 오염도를 검토한 결과, 팔당댐 방류량이 갈수량 조건인 약 200m<sup>3</sup>/sec와 평균유량인 약 470m<sup>3</sup>/sec의 경우, 노량진 지점에서의 BOD농도가 약 1mg/l의 차이를 보였다. 따라서 향후 한강 수질의 적절한 유지관리를 위해서는 기존 하수처리장에서의 최적운영에 따른 처리효율의 극대화와 함께 갈수시에 팔당댐 방류량의 증가가 수반되어야 할 것이다.

## 4.2 지점간 수질 항목의 상관성

팔당지점부터 노량진지점 사이에서 지점간 수질 항목들의 상관분석을 실시하였으며, DO 항목은 모든 지점간에 0.6이상의 상관계수값을 보였고 나머지 항목은 구의지점 하류부에서만 상관성을 보였다. 이는 DO 항목이 유량과 유입 오염부하량의 영향에 비교적 덜 민감했다고 볼 수 있으며, BOD, COD, E-Coli. 항목 등은 하류로 내려오에 따라 상관계수가 커져 지류유입에 따른 영향이 다른 항목에 비해 크다는 것을 알 수 있다.

지류유입 상하류 지점간의 관계를 살펴 보면 왕숙천이 유입하는 팔당-구리 지점간은 DO 항목과 E-Coli. 항목을 제외하고는 수질 항목들간의 상관성이 없는 것으로 나타났으며, 이는 이 구간이 다

표 3. 유량과 수질 항목들의 월별 상관계수

月	log Q -log DO	log Q -BOD	log Q -log COD	log Q -SS
1	0.161	0.807	0.721	0.506
2	0.436	0.696	0.697	0.727
3	0.424	0.743	0.566	0.437
4	0.492	0.553	0.391	0.627
5	0.422	0.586	0.184	0.464
6	0.348	0.509	0.297	0.100
7	0.217	0.324	0.382	0.207
8	0.084	0.533	0.300	0.457
9	0.114	0.110	0.268	0.141
10	0.416	0.876	0.428	0.447
11	0.281	0.802	0.678	0.386
12	0.253	0.770	0.660	0.414

표 4. 지점간 수질 항목들의 상관식

항 목	상 관 식	상관계수
DO	$DO_{노량진} = 0.69 \cdot DO_{팔당} + 1.57$	0.66
	$DO_{구의} = 0.97 \cdot DO_{구리} + 0.11$	0.96
BOD	$BOD_{보광} = 1.43 \cdot e^{(0.29 \times BOD_{쪽도})}$	0.78
COD	$COD_{보광} = 0.83 \cdot COD_{쪽도} + 1.26$	0.73
SS	$SS_{보광} = 1.66 \cdot SS_{쪽도}^{0.78}$	0.74
pH	$pH_{구의} = 3.29 \cdot e^{(0.11 \times pH_{구리})}$	0.84
E-Coli.	$E-Coli_{보광} = 0.71 \cdot E-Coli_{쪽도} + 28778.15$	0.79

른 구간에 비해 거리가 길다는 것 외에도 왕숙천의 유입영향이 적다는 것을 보여 주는 것이다. 반면에 구의-쪽도 지점간, 쪽도-보광 지점간은 모든 항목의 상관성이 큰 것으로 나타났다. 이는 탄천과 중앙천의 오염부하량의 영향으로 판단된다.

지점간 상관분석 결과에서 팔당 지점의 수질오염도로부터 노량진 지점의 오염도를 추정할 수 있을 것으로 판단되는 항목은 DO 항목이었다.

팔당-노량진 지점간 DO 항목의 상관식과, 모든 항목 중 상관성이 가장 큰 지점간의 상관식은 표 4와 같으며, 그림 5는 쪽도-보광 지점간 BOD 항목의 상관도이다.

### 4.3 상호상관분석

수질 항목들은 계절적 변동성에 따른 주기성을

가지고 있으므로 각 항목간에는 시간지체에 따른 상관관계 및 주기성이 존재할 것으로 판단되어 지점별로 각 월 시계열간의 상호상관분석을 시도하였다.

#### 4.3.1 유량과 수질 항목

유량자료의 취득이 가능한 팔당, 구의, 노량진 지점에 대해 상호상관분석을 실시하였으며, 그 결과는 전반적으로 1차 상호상관계수, 즉 지체가 1개월인 경우의 상관계수값이 일반적인 두 항목간의 상관계수값과 큰 차이를 보이지 않아 시간적 동시성에 따른 관계는 두드러지게 나타나지 않았다. 그러나 주기성을 가지고 있는 시계열인 DO, BOD, COD 항목의 경우 유량과의 상호상관도(cross correlogram)에서 볼 수 있는 것처럼 12개월의 뚜렷한 주기를 가지고 있어 계절적인 변동에 따른

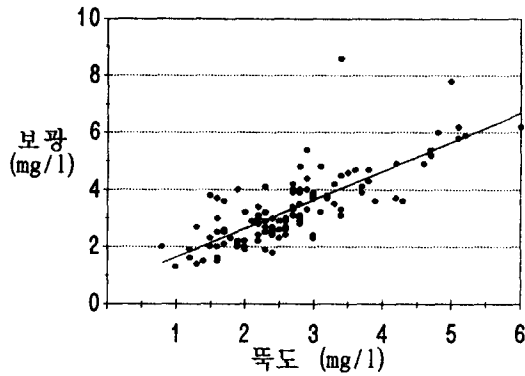
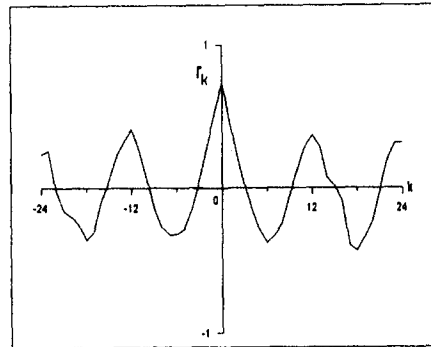


그림 5. 탁도-보광 지점간 BOD 상관도



(a) BOD

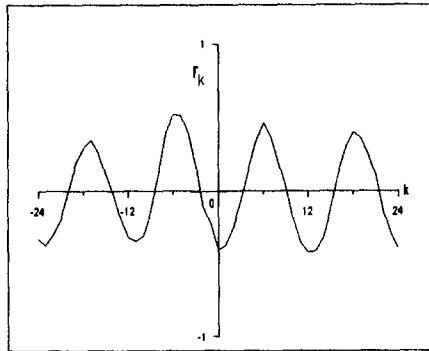
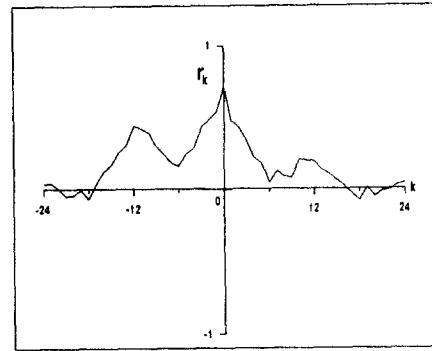


그림 6. Cross Correlogram(팔당 지점 Q-DO)



(b) SS

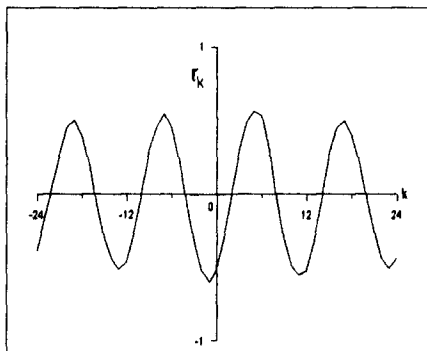


그림 7. Cross Correlogram(노량진 지점 COD-TEMP)

그림 8. Cross Correlogram(보광-노량진 지점간)

경향은 상관성을 가지고 있음을 보여 주었다. 또한 계절상관도의 검토에서 주기성이 없었던 pH, SS, E-Coli. 항목의 경우 유량과의 상호상관분석에서는 계절적 주기성을 보여 주었다.

그림 6은 팔당지점의 유량과 DO 항목간의 상호상관도이다.

#### 4.3.2 지점별 수질 항목

수질 항목 중 계절적 주기성을 가지고 있는 수온, DO, BOD, COD 등 네 항목들간의 분석을 실시하였으며, 1차 상호상관계수값이 각각 항목들간의 단순 상관계수값에서처럼 수온-DO, BOD-COD 항목간이 상대적으로 큰 값을 보이고 있다.

그림 7은 노량진 지점에서 COD-수온 항목간의 상호상관도이며, 유량과 수질 항목간의 관계에서와 마찬가지로 단순 상관관계보다는 주기적인 상관성을 더 크게 찾아 볼 수 있었다.

#### 4.3.3 지점간 수질 항목

1차 상호상관계수가 역시 단순 상관계수의 크기에 비례하는 경향을 나타냈으며, 주기성을 가지고 있는 DO, BOD, COD 항목은 상호상관관계 역시 12개월의 뚜렷한 주기를 보이고 있었으며 SS, pH, E-Coli. 항목도 지점간 상호상관분석에서는 계절별 주기성을 나타내고 있었다.

상관관계분석 결과에서와 마찬가지로 왕숙천 유입구간인 팔당-구리 구간보다는 탄천, 중랑천이 유입하는 구의-뚝도, 뚝도-보광 구간의 상호상관관계가 더 큰 것으로 나타났다.

그림 8은 BOD와 SS 항목에 대한 보광-노량진 지점간의 상호상관도이다.

### 5. 결 론

(1) 한강하류부 월 수질자료의 기본 통계특성치 및 확률분포형을 산정하였다. 이 구간의 DO, BOD 항목은 연중 계절적 변동성을 강하게 가지고 있었으며, 수온 및 DO 항목은 정규분포가, BOD 항목은 대수정규분포가 지배적인 확률분포형임을 알 수 있었다.

(2) Thomas-Fiering 모형과 ARMA(1,1) 모형을 이용하여 노량진 지점 DO, BOD의 장기간 모의를 실시하였으며, 관측자료와의 검토시 만족스러운 결과를 보여 이들 모형은 향후 수질자료의 예측에 적용할 수 있을 것이다.

(3) 유량과 수질 항목과의 관계는 큰 상관성을 찾아 볼 수 없었다. 계절적 요인을 제거한 월별 분석 결과에서는 DO와 SS 항목은 유량과 직접적인 상관성을 보이지 않았으며, BOD와 COD 항목은 유량이 많은 하절기를 제외하면 유량의 크기에 민감한 것으로 판단된다. 따라서 한강 하류부는 유량

보다는 유입 오염부하량에 더 많은 영향을 받는 것으로 사료되었으며, 팔당댐 방류량 조건과 지류 유입부하량에 대한 상관성 분석 등의 연구가 향후 구명되어야 할 것이다.

(4) 지점간 수질 항목들의 상관분석 결과, DO 항목은 전 지점간에 상관성을 가지고 있었으며 수질 항목 중에서 DO 항목이 유량과 오염부하량의 영향을 가장 적게 받는다는 것을 알 수 있었다.

(5) 각 수질 항목들의 상호상관분석 결과, 동시성에 따른 상관성보다는 계절적 변동에 의한 강한 주기성을 확인할 수 있었다. 자체의 시계열에서 뚜렷한 주기성을 보이지 않았던 pH, SS, E-Coli. 항목은 상호상관분석에서는 뚜렷한 주기성을 보여, 모든 수질 항목들은 계절성이 있음을 확인할 수 있었다.

### 참 고 문 헌

- 한국수문조사연보. (1987-1993). 건설부.  
 윤용남 (1986). 공업수문학. 청문각.  
 이흥근 (1982). "한강하류부의 수질변동에 대한 추계학적 특성," 박사학위논문, 서울대학교.  
 한국환경연감. (1988-1994). 환경처  
 황임구, 윤태훈 (1981). "하천오염인자의 통계적 특성." 한국수문학회지, 제14권, 제4호, pp. 19-26.  
 Hahn, R.L. (1972). "Time series analysis of daily measurements of water quality parameters of the Passaic River at Little Falls, New Jersey," M.S. thesis, Rutgers Univ., New Brunswick, N.J.  
 Kottegoda, N.T. (1980). *Stochastic water resources technology*. Macmillan Press.  
 Mehta, B.M., Ahlert, R.C., and Yu, S.L. (1975). "Stochastic variation of water quality of the Passaic River." *Water Resources Research*, Vol. 11, No. 2, pp. 300-308.  
 Thomann, R.V. (1976). "Time series analysis of water quality data." *J. of San. Eng. Div.*, ASCE, Vol. 93, No. 1, pp. 1-23.  
 (접수: 1995년 10월 11일)