

## 수질자료 결측구간의 오염부하 추정기법 비교평가 Comparative Evaluation of the Pollutant Load Estimation Method in the Water Quality Data Missing Intervals

조범준\* · 조홍연\* · 강성현\*\*

Beom Jun Cho\*, Hong Yeon Cho\* and Sung Hyun Kahng\*\*

**요 지** : 수량 및 수질자료, 특히 수질자료가 없는 구간에서의 직접계산에 의한 오염부하 산정은 불가능하기 때문에 적절한 방법을 이용하여 결측구간의 자료를 보완(data filling)하여 계산하는 추정과정을 필요로 한다. 본 연구에서는 수질자료가 없는 구간, 즉 수질 결측구간에서 오염부하량을 산정하기 위한 다양한 농도 추정방법을 제시하고, 제시된 방법을 이용하여 추정된 농도변화 양상 분석 및 오염부하 변동양상을 비교·분석하여 보다 효과적이고, 효율적인 추정방법을 최종 제안하였다. 또한, 오염부하에 영향을 미치는 수량 및 수질인자의 상대적인 중요성과 연안 하천의 오염부하 특성을 구분할 수 있는 영향인자를 제시하였다. 수질자료 결측구간의 다양한 농도 추정방법을 이용하여 한강하구의 오염부하를 산정한 결과, 결측구간을 제외하고 추정한 오염부하는 매우 낮은 비현실적인 결과를 제시하였으며, 가용자료의 변동성을 고려한 선형내삽법이 가장 적합한 방법으로 파악되었다. 또한, 한강하구의 오염부하양상은 수량주도형으로 판단되었으며, 결측구간의 농도추정은 불가피한 과정으로 적절한 추정방법을 이용하는 것이 보다 바람직한 것으로 파악되었다.

**핵심용어** : 결측구간, 추정방법, 수량 및 수질자료, 오염부하량, 영향인자

**Abstract** : Direct estimation of the pollutant load(PL) should be carried out by the data filling in the missing intervals using an appropriate method because it is impossible in which the flow discharge(water quantity) or water quality(WQ) time-series data set have the missing intervals. In this study, the several methods estimating the water quality in the missing periods are suggested and the WQ and pollutants load change patterns are compared and evaluated based on the reproducible degree of the available data change patterns. The most appropriate method is finally suggested and the contribution factor deciding the influence degree and the PL characteristics of the river estuary is also suggested. Based on the PL estimation results using the several methods, the interpolation method considering the fluctuation of the available WQ data is shown to be most efficient. The PL patterns of the Han river estuary is classified as the discharge-dominated type. The data filling process is inevitable and the WQ estimation using the efficient and effective method should be carried out in order to estimate reasonable PL.

**Keywords** : missing intervals, estimation method, flow discharge and water quality data, pollutant load, contribution factor

### 1. 서 론

연안해역의 환경변화를 정확하게 예측하기 위해서는 환경변화에 영향을 미치는 인자, 즉 육상에서 발생하는 오염

물질의 해역 부하량에 대한 시간적·공간적인 변화양상 및 정확한 오염부하량 추정이 중요한 부분을 차지하고 있다. 육상기인 오염부하량을 정확하게 추정하기 위해서는 육상에서 배출되는 오염물질의 이동경로 및 수량·수질에 대한

\*한국해양연구원 연안개발연구본부(Corresponding author : Beom Jun Cho, Coastal Engineering Research Department, Korea Ocean R&D Institute, Ansan PO Box 29, Seoul 425-600, Korea. bjcho@kordi.re.kr)

\*\*한국해양연구원 해양환경연구본부(Marine Environment Research Department, KORDI)

정보가 수량 및 수질의 시간적·공간적인 변동양상을 반영할 수 있는 빈도로 관측되어야 한다. 그러나, 현재 수행되고 있는 오염부하량 추정방법은 비용 및 인력의 제한으로 인하여 추정방법의 신뢰도 및 정확도에 대한 검증없이 월별 관측자료를 이용하여 추정하는 경우가 대부분을 차지하고 있다(이광우 등, 1980; 이찬원·권영택, 1994). 연속적인 수량자료와 간헐적인 수질자료를 이용하여 수량·수질 상관관계를 분석하여 오염부하량을 추정하는 경우도 있으나, 상관관계가 낮은 경우에는 적용이 곤란한 단점이 있다. 해역의 환경변화를 예측하기 위하여 추정된 오염부하량이 큰 오차를 가지고 있는 경우에는 정확한 해역 환경변화 예측이 불가능하며, 잘못된 분석결과를 제시할 수도 있기 때문에 오염부하량을 정확하게 추정하는 작업은 해역환경 변화 예측 및 환경개선사업의 정량적인 효과분석 평가에 매우 중요한 위치를 차지하고 있다(조홍연·채장원, 1998; 조홍연 등, 2004).

오염부하 추정은 연속적인 수량 및 수질자료를 이용하여 산정한다. 기존의 오염부하량 산정방법은 수량 및 수질의 시간적인 변화가 없는 경우(steady state)에 별 문제가 없으나, 수량 및 수질의 시간적인 변화가 있는 경우에 시간적인 편차성분의 영향을 받으므로 일정한 기간의 수량 및 수질자료를 평균하여 추정하는 방법은 편차성분이 반영되어 있지 않기 때문에 기본적으로 오차를 포함하게 된다. Table 1은 일정한 기간 내에 수량과 수질 측정횟수에 따른 추정된 오염부하량을 분류한 것이다.

일반적으로 수질모형은 오염부하를 입력자료로 하여 하천 및 해역의 수질변화를 예측하기 때문에 정확한 오염부하 입력이 매우 중요하다(조홍연·채장원, 1993). 그러나, 수질예측 모형 입력자료의 신뢰수준에 대한 특별한 제한사항 및 권장사항 등은 없는 실정이다. 다만, 오염총량관리기본계획 수립지침 고시(환경부 고시, 제2006-69호), 제15조(오

염총량관리계획 이행 모니터링)에서 「하천에 수질 및 유량(수량)관측소를 설치하여 특정요일이 연속되지 않는 7일 이상 간격(8~12일 일간격 정도)으로 연간 30회 이상 오염부하량 변화에 따른 수질영향을 파악하여야 한다」라고 고시하고 있다. 그러나, 이 규정은 한강을 포함한 금강, 낙동강, 영산강 및 섬진강 수계에만 적용되고 있는 상황이다. 또한, 관측빈도가 추정 오염부하량의 정확도에 직접적인 영향을 미치며, 수량 및 수질의 관측기간이 짧아질수록 오염부하 정확도가 증가하게 되기 때문에 가능한 짧은 관측간격의 수량 및 수질자료를 이용하여 오염부하를 추정하고 있다(Di Toro & Connolly, 1980; Thomann & Mueller, 1987; 조홍연 등, 2006). 수량 및 수질자료의 관측간격이 차이는 경우에는, 일반적으로 수량이 일 단위이고, 수질이 월 단위인 경우에는 수질자료를 일 단위 자료로 내삽하여 일 단위의 오염부하를 계산하는 방법이 활용되고 있다(Cerco 등, 2004).

수량 및 수질자료, 특히 수질자료가 없는 구간에서의 직접계산에 의한 오염부하 산정은 불가능하다. 적절한 방법을 이용하여 결측구간의 자료를 보완(data filling)하여 계산하는 추정과정을 필요로 한다. 이 단계에서 중요한 문제는 결측구간의 자료를 어떤 방법으로 보완하는가 하는 문제이다.

본 연구에서는 수질자료가 없는 구간, 즉 수질 결측구간에서 오염부하량을 산정하기 위한 다양한 농도 추정과정을 제시하고, 추정된 결과로부터 농도변화 양상 분석 및 산정된 오염부하 변동양상을 비교·분석하여 효과적이고, 효율적인 추정방법을 제안하는 것을 목적으로 한다. 또한, 오염부하 산정에 미치는 수량 및 수질의 상대적인 기여정도를 파악하고, 오염부하 특성을 파악할 수 있는 영향인자(오염부하 기여인자, contribution factor)를 수량 및 수질자료의 변동범위 자료에 근거하여 제안하였다.

**Table 1.** Classification of the Pollutants Load Estimation based on the Data Interval

Level	Flow Discharge	Water Quality	Remarks
	Time-series Data Interval	Time-series Data Interval	
I	monthly (one~four times measurement)	monthly (one~two times measurement)	highly probable large bias error, large estimation error
II	daily (continuous measurement data)	monthly (one~two times measurement)	most general estimation method
III	monthly (one~four times measurement)	daily (continuous measurement data)	only applied to the small discharge changes condition, frequent occurrence of the water quality missing data intervals
IV	daily (continuous measurement data)	daily (continuous measurement data)	most correct/reliable method, but high cost, frequent occurrence of the water quality missing data intervals

## 2. 수질 농도자료 추정 방법

본 연구에서의 수량은 국가수자원관리 종합정보시스템(www.wamis.go.kr)에서 제공하는 일별 유량측정자료에서 팔당댐 방류량 자료를 김포대교의 자료로 환산하여 사용하였다. 즉, 한강 하구의 수량(김포대교 지점; 신곡수중보 상류)은 2006년 5월 16일부터 10월 11일까지의 팔당댐 방류량을 팔당댐 유역면적 대비 팔당댐 하류에서부터 김포대교 지점까지의 추가되는 유역면적비로 계산하였다.

수질은 2006년 5월 16일부터 10월 11일까지 COD, TN 및 TP 항목을 관측한 농도자료이며, 제시된 수질오염공정시험방법(환경부 고시, 제2004-188호)으로 분석하였다. 2006년 7월 14일부터 8월 6일까지 수질 자동채수지점(교수부지)의 범람으로 연속 수질관측을 수행하지 못해서, 수질농도자료의 결측이 발생하였다. 결측된 수질농도자료를 추정하기 전에 결측된 수질농도자료의 개수는 관측된 수질농도자료의 개수보다 작아야 한다는 가정에 따른다. 이러한 가정의 근거는 추정하기 전·후의 오염부하량을 산정해 보면 파악될 수 있으며, 결론부분에서 보다 구체적으로 설명될 것이다. 전체 수질 관측자료에서 결측자료가 차지하는 비율은 약 16% 정도이다. 결측된 수질농도자료는 8가지 통계적 방법에 따라서 추정하여 비교·분석하였다. 다음은 각각의 추정 방법을 설명한 것이다.

첫 번째, 선형보간(Linear Interpolation, LI) 방법은 결측구간의 시작 직전과 결측구간 종료 직후 수질 관측자료를 선형보간하여 결측구간의 자료를 추정한 것이다. 수질농도자료의 변동 양상이 반영되지 못하는 단점이 있으나, 매우 일반적이고, 수월한 추정방법이다.

두 번째, 수정 선형보간(Modified LI) 방법은 기존 선형보간방법에 의한 추정 농도 변화 양상이 관측자료의 변동(fluctuation) 성분이 없기 때문에 비현실적인 변화양상을 보이는 관계로 현실적인 변화 양상을 반영하기 위하여 선형추산 농도자료에 변동성분을 가용한 수질 관측자료의 표준편차 성분을 감안하여 추가하여 결측구간의 농도자료를 추산하는 것이다. 자료의 변동양상이 실질적인 자료와 유사하나, 난수발생 성분의 영향이 상당하며, 본 연구에서는 Uniform 분포를 따르는 난수(수질변동범위에 해당하는 값)를 발생, 표준편차는 가용 수질자료의 표준편차 자료를 이용하였다.

세 번째, 회귀분석(오염부하-수량)에 의한 방법은 가용한 수량자료와 오염부하 자료를 이용하여 최적 회귀곡선식을 도출하여 수질자료 결측구간의 오염부하를 수량자료를 이

용하여 추정하고, 추정된 오염부하 자료와 수량자료를 이용하여 결측구간의 수질 농도를 추정하는 것이다.

네 번째, Robust 추정(Outlier 제거, 회귀분석방법)에 의한 방법으로 회귀분석 방법은 대부분의 자료가 있는 경우보다, 이상자료(outlier)의 영향이 크게 나타나서 전체적인 변화경향을 좌우하는 단점이 있기 때문에, 가용한 자료에서 이상자료로 판단(일반적인 경우, 평균에서 크게 벗어나는 자료,  $\text{평균} \pm 3 \sim 5 \times (\text{표준편차})$  범위를 벗어나는 값; Draper and Smith, 1981)되는 자료를 제거하여 도출된 최적 회귀곡선식을 사용하여 수질자료 결측구간의 오염부하를 수량자료를 이용하여 추정하고, 추정된 오염부하 자료와 수량자료를 이용하여 결측구간의 수질 농도를 추정하는 방법이다. 일반적으로, 수량변화가 오염부하를 주도하는 경우에는 수량과 오염부하의 상관관계가 크게 나타나기 때문에 비교적 정확한 방법이다. 그러나, 상관관계가 미흡한 경우에는 적용이 곤란하며, 대부분의 자료 변화 경향을 반영하기 때문에 전체적으로 집중호우 및 오염사고 등에 의해서 일시적으로 과도한 오염부하 영향은 과소추정되는 경향이 발생할 수 있다.

다섯 번째, 통계정보를 유지하는 방법으로 가용한 수질자료의 통계정보(본 연구에서는 평균, 표준편차)를 유지하도록 수질자료 결측구간의 자료를 분포함수로 이용함으로써 난수를 발생하여 추정하는 방법이다. 보다 정확한 방법은 가용한 수질자료의 분포함수로 추정함으로써 결측구간의 농도자료를 발생하여 추정하는 것이 바람직하나, 물리적인 변화가 예상되는 기간 또는 지점에서의 일반적인 변화 경향보다는 가용한 자료의 변화 범위의 한계에서 변화하는 단점이 있다.

여섯 번째, 가용한 수질자료를 이용하는 방법은 실질적으로 가능할 수도 있고, 가능하지 못할 수도 있다. 결측구간에서 수행된 타 기관의 자료를 활용하는 방법이나, 일반적으로 연구목적의 관측자료보다 관측간격이 매우 크기 때문에 가용한 관측자료를 기초로 하여 적절하게 추정하는 방법이다. 본 연구에서는 환경부 월별 수질자료를 이용하여 수질자료의 결측구간 일별 농도자료를 추정하였다. 추정방법은 결측구간에 해당하는 월 농도자료에 가용한 수질자료의 표준편차를 고려한 변동성분을 추가하여 실질적인 농도 변화 양상을 반영하도록 추정함으로써 수행하였다. 이 방법에서 가용한 수질자료의 시간간격이 크기 때문에 수질 변동을 대표할 수 있는 자료의 대표성 문제가 중요하다. 하나의 자료에 근거하여 결측구간의 수질농도자료를 추정하기 때문에 대표성이 부족할 수 있는(편기된) 가용한 자료의

영향을 크게 받는다는 단점이 있으나, 관측자료에 근거한다는 점에서 비교적 실질적인 방법으로 판단된다. 이 방법은 통계적인 회귀분석 방법과 병행하면 관측자료에 근거하기 때문에 다양한 기술적인 방법 제시에 유용하나 관측자료가 미흡한 경우에는 변동성이 큰 단점이 있다. 이 방법을 이용한 수질결측자료 추정 사례는 미흡한 실정이나, 인천 연안 및 시화호 해역의 COD 오염부하 추정에 적용된 바 있다(조홍연 · 조범준, 2006).

일곱 번째, 첫 번째부터 여섯 번째까지의 방법으로 추정된 수질농도자료를 산술평균하여 이용하는 방법이다.

여덟 번째, 결측구간을 제외하고, 어떤 방법을 이용하여 추정하지 않으며, 무시하는 방법이다. 실질적으로 결측구간의 정보를 포기하는 방법으로, 결측구간 정보를 무시할 수 있는 상황 또는 결측구간의 정보가 중요하지 않은 상황에서만 적용될 수 있는 방법이다.

### 3. 결측구간 농도 추정방법의 적용

#### 3.1 한강 하구의 수량 및 수질측정 자료

한강 하구 김포대교 지점의 2006년 수량은 기본적으로 약  $160(\text{m}^3/\text{s})$  정도를 상회하는 수량으로 유지하고 있으나, 한강유역 집중호우시에는 팔당댐의 일시적인 방류로 인하여 특히 7월 14일부터 8월 6일까지의 수량은 큰 변동폭을 보여주고 있음을 알 수 있다(Fig. 1). 한편, 경기만으로의 한강 오염부하를 추정하기 위하여 신곡수중보 상류지점(김포

대교 지점)에서 연속적으로 수질관측을 수행하여 왔으나, 이 시기에는 수질 자동채수지점(고수부지)이 범람하여 연속 수질관측을 수행하지 못한 관계로 시계열 수질자료의 결측구간에 해당한다. Fig. 2~4는 COD, TN 및 TP 관측농도를 도시한 것이며, 고수부지 범람 이전의 관측구간과 범람시기의 결측구간, 고수부지 지역이 다시 노출되어 이후 재관측을 수행한 기간을 포함하고 있다. COD 농도는 결측구간 전까지 대체적으로  $3\sim 15(\text{mg/L})$ 의 범위를 나타내고, 그 이후로는  $2\sim 7(\text{mg/L})$ 의 범위를 보이고 있다. 결측구간 전까지 TN 농도도 COD 농도와 마찬가지로 대체적으로  $3\sim 15(\text{mg/L})$ 의 범위를 나타내고 있으나, 그 이후로는  $2\sim 13(\text{mg/L})$ 의 범위를 보이고 있다. TP 농도는 결측시기 이전 며칠 동안은 큰 변동폭을 보이고 있으며, 그 이후로  $0.2\sim 0.9(\text{mg/L})$ 를 나타내고 있다.

#### 3.2 결측구간의 추정농도 변화 양상

수질농도자료 중에서 결측구간이 위에서 설명한 6가지 방법(M-1~M-6)에 의하여 추정되었다. 추정구간의 전체적인 농도변화 양상을 파악하기 위하여 결측구간과 더불어 7일 이전과 7일 이후의 자료까지 포함하여 나타내었다(Fig. 5-7). M-1은 선형보간법, M-2는 수정한 선형보간법, M-3는 회귀분석법, M-4는 Robust 추정에 의한 방법, M-5는 통계정보(난수발생)를 유지하는 방법, M-6은 가용한 수질자료를 이용하는 방법(환경부 자료 이용)이다.

COD 농도 결측구간의 변화양상을 보면, 다른 추정방법

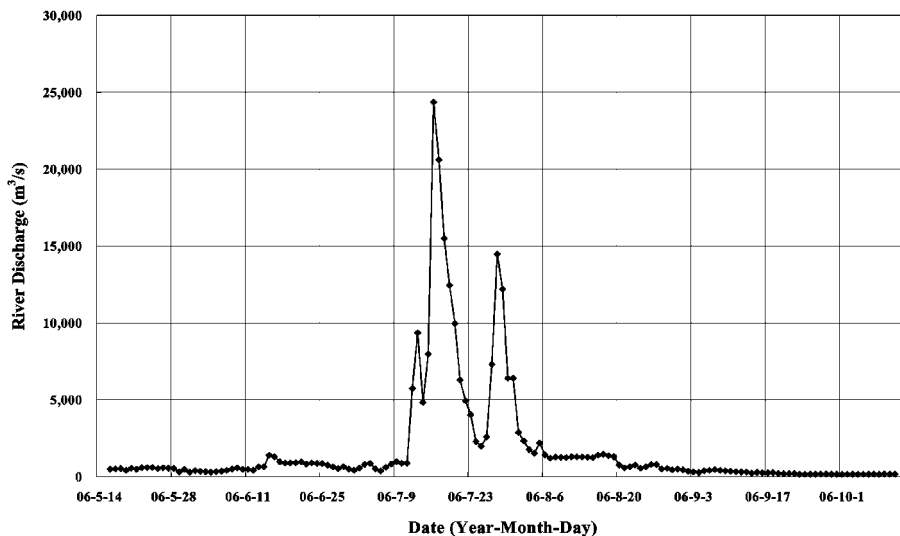


Fig. 1. Han-river estuary daily discharge at gimpo bridge station (2006).

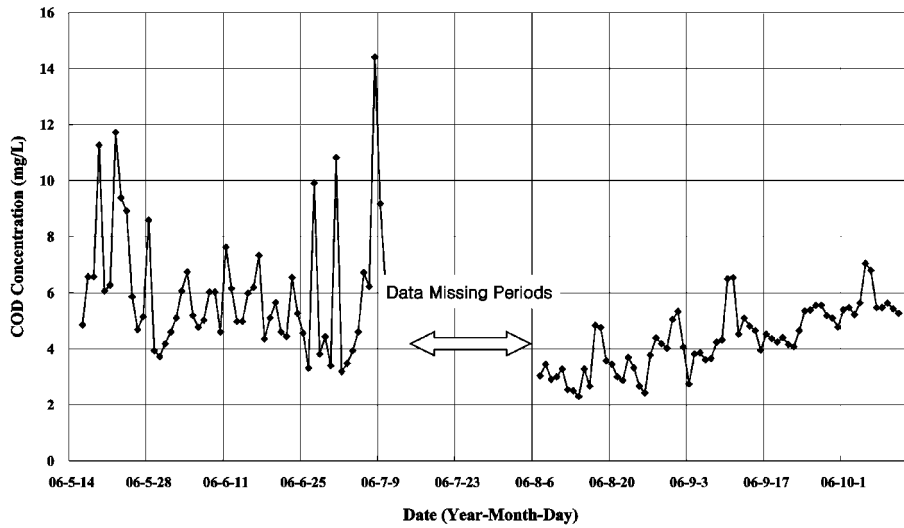


Fig. 2. Measured COD concentration change at gimpo bridge station (2006).

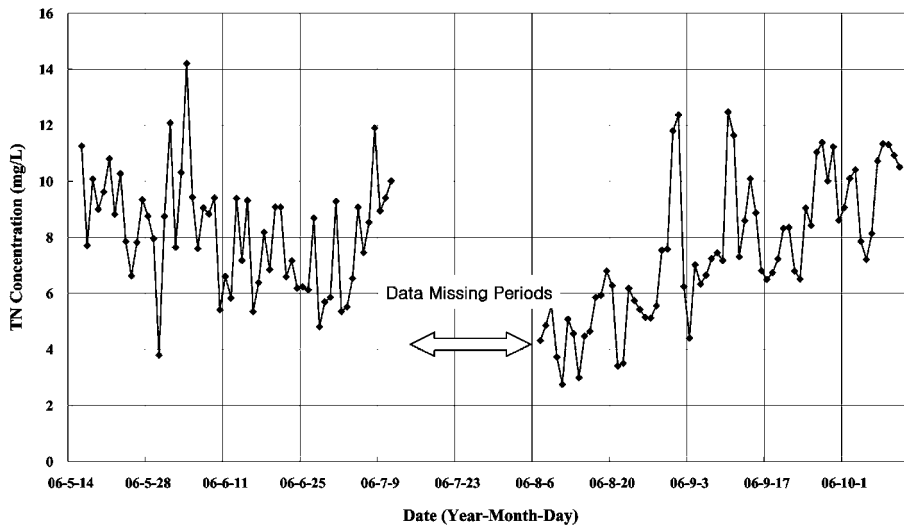


Fig. 3. Measured TN concentration change at gimpo bridge station (2006).

보다 수정한 선형보간방법(M-2)과 통계정보를 유지하는 방법(M-5)이 현실적으로 결측구간의 COD 농도 자료를 가장 잘 재현한 것으로 보인다. 그 이유는 M-1, M-3, M-4 및 M-6 방법으로 추정된 COD 농도자료를 보면, 관측자료의 변동 성분이 없이 그대로 유지되는 비현실적인 변화양상을 보여주기 때문이다.

TN 농도와 TP 농도도 COD 농도와 마찬가지로 다른 추정방법보다 M-2와 M-5 방법이 TN 농도 자료를 가장 현실에 적합하게 재현한 것으로 보인다. 특히, M-5 방법은 난수를 발생하여 추정하는 방법으로 가용한 자료의 변화 범

위의 한계를 벗어나는 경향이 있어서 변동폭이 M-2 방법으로 추정된 것보다 크다는 사실을 알 수 있다. 따라서, 결측구간의 수질농도자료를 추정하는 방법으로 M-2와 M-5 방법이 현실적인 농도자료를 상대적으로 잘 재현한 것으로 보이고, 그 중에서도 가용 자료의 변화 범위의 한계로 인하여 M-2 방법이 가장 적절한 추정방법으로 판단된다.

**3.3 결측구간 자료 추정 전·후의 수질자료 통계정보 변화**  
 결측구간 자료 추정 전·후의 통계정보(평균, 중앙값 (Median), 표준편차, 변동계수, 최대값, 최소값, 범위)를 각

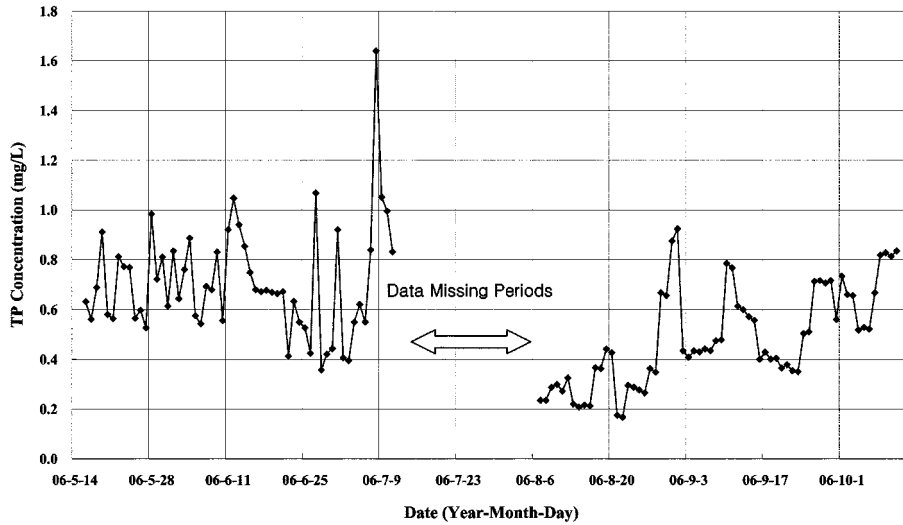


Fig. 4. Measured TP concentration change at gimpo bridge station (2006).

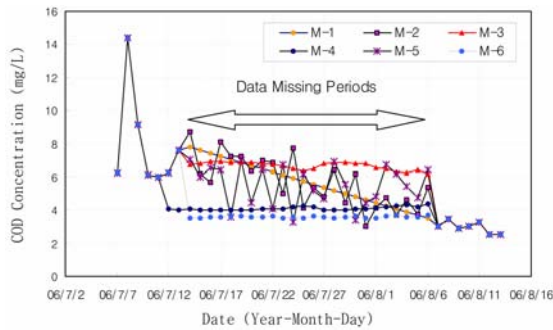


Fig. 5. COD concentration change pattern of estimation with data missing periods at gimpo bridge station (2006).

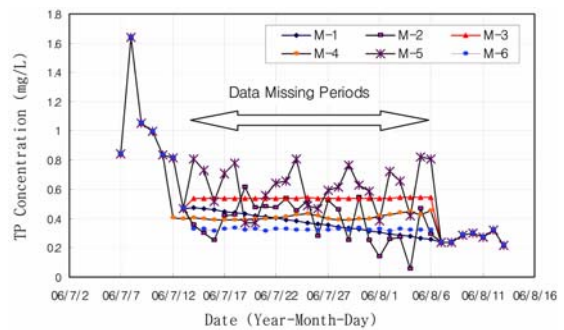


Fig. 7. TP concentration change pattern of estimation with data missing periods at gimpo bridge station (2006).

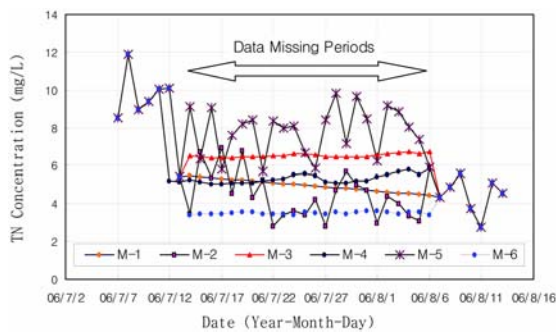


Fig. 6. TN concentration change pattern of estimation with data missing periods at gimpo bridge station (2006).

방법에 대하여 분석하였다. 분석결과에 의하면, 통계적인 정보변화는 크게 나타나고 있지 않은 것으로 파악되었다(Table 2). 난수 발생이 포함된 방법(M-2, M-3 및 M-5)은 통계정보가

적용될 때마다 미미한 변화를 수반하고 있으며, 이는 추정 방법에 의한 영향이라기 보다는 가용한 자료(관측자료)에 대한 결측구간 자료(추정자료)의 상대적인 비율에 의하여 통계적인 특성이 결정되는 것으로 판단된다. 즉, 결측구간이 가용한 자료구간에 비하여 어느 정도 차지하고 있는가에 의해서 통계적인 경향이 나타나는 것으로 생각된다.

#### 4. 오염부하 변동 특성 분석

##### 4.1 오염부하와 수량, 수질의 상관관계

오염부하량과 수량, 오염부하량과 수질의 상관관계를 분석하였으며, 상관관계 분석은 산포도(Scatter Plot)를 이용하여 수행하였다. 오염부하량과 수량에 대한 상관 관계도는 Fig. 8에 제시하였다. 그림에서 보는 바와 같이, COD와 TN

**Table 2.** Statistical information changes before and after missing WQ data estimation

COD		Average (mean)	Average (median)	Standard deviation	COV	Max. value	Min. Value	Range
	before Estimation	5.1	4.8	1.951	0.380	14.4	2.3	12.1
after estimation	M-1	5.2	5.0	1.858	0.358	14.4	2.3	12.1
	M-2	5.2	4.9	1.964	0.378	14.4	2.3	12.4
	M-3	5.4	5.2	1.869	0.346	14.4	2.3	12.1
	M-4	5.0	4.5	1.815	0.366	14.4	2.3	12.1
	M-5	5.1	4.8	1.851	0.363	14.4	1.8	12.6
	M-6	4.9	4.6	1.877	0.382	14.4	2.3	12.1
	M-7	5.2	5.0	1.794	0.347	14.4	2.3	12.1
	M-8	5.1	4.8	1.951	0.380	14.4	2.3	12.1
TN		Average (mean)	Average (median)	Standard deviation	COV	Max. value	Min. Value	Range
	before Estimation	7.8	7.6	2.320	0.298	14.2	2.7	11.5
after estimation	M-1	7.3	7.0	2.385	0.326	14.2	2.7	11.5
	M-2	7.4	7.2	2.327	0.313	14.2	2.7	11.5
	M-3	7.6	7.0	2.175	0.287	14.2	2.7	11.5
	M-4	7.4	6.8	2.312	0.314	14.2	2.7	11.5
	M-5	7.6	7.5	2.228	0.292	14.2	2.7	11.5
	M-6	7.1	7.0	2.644	0.372	14.2	2.7	11.5
	M-7	7.4	7.0	2.290	0.309	14.2	2.2	12.0
	M-8	7.8	7.6	2.320	0.298	14.2	2.7	11.5
TP		Average (mean)	Average (median)	Standard deviation	COV	Max. value	Min. Value	Range
	before Estimation	0.6	0.6	0.236	0.401	1.6	0.2	1.5
after estimation	M-1	0.5	0.5	0.234	0.425	1.6	0.2	1.5
	M-2	0.6	0.5	0.232	0.417	1.6	0.2	1.5
	M-3	0.6	0.5	0.216	0.372	1.6	0.2	1.5
	M-4	0.6	0.5	0.224	0.403	1.6	0.2	1.5
	M-5	0.6	0.6	0.223	0.379	1.6	0.2	1.5
	M-6	0.5	0.5	0.236	0.433	1.6	0.2	1.5
	M-7	0.6	0.5	0.223	0.396	1.6	0.2	1.5
	M-8	0.6	0.6	0.236	0.401	1.6	0.2	1.5

오염부하량과 수량과의 상관관계는 어느 정도 상관성이 있음을 알 수 있지만, TP 오염부하량과 수량과의 상관관계는 다소 낮게 나타나고 있다.

오염부하량과 추정 전 수질항목에 대한 산포도와 회귀곡선을 Fig. 9에 제시했으며, 상관계수 제곱에 해당하는 결정계수(coefficient of determination; Kottegoda and Rosso, 1997)가 0.2808, 0.0015 및 0.2928로 전반적으로 낮게 나타났다. 특히, TN 항목의 오염부하량과 수질농도는 상관관계가 매우 낮은 것으로 파악되었다. 이는 오염부하량과 수질농도의 상관관계 도출에 의해서 오염부하량을 추정하기가 어렵

다는 한계성이 있으며, 한강 하구 김포대교에 의하여 형성된 수역에서는 일반적인 특성으로 TN 오염부하량과 수질농도의 상관관계가 매우 낮다고 제시할 수 있다.

#### 4.2 추정방법에 따른 오염부하 변동 양상 및 범위

7가지 추정방법에 따른 가용구간과 결측구간을 모두 포함한 오염부하량 변동 양상을 나타내었다(Fig. 10). 관측시기별 COD, TN 및 TP의 7가지 추정방법에 따른 오염부하량은 대체적으로 모두 비슷한 변화경향을 보여주고 있다. 유사한 변화 경향의 원인은 오염부하가 수량이 주도적인 역

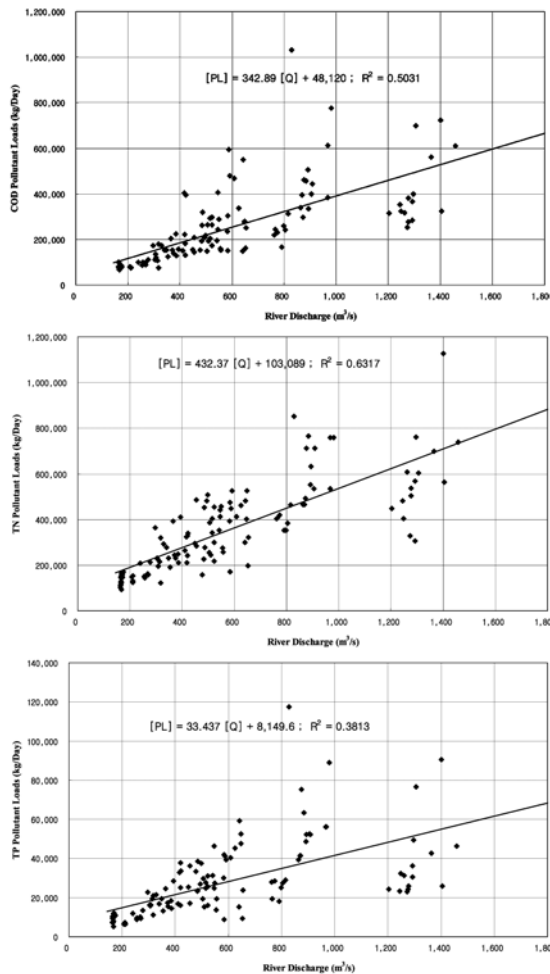


Fig. 8. Scatter diagram in pollutant load and flow discharge data.

할을 하기 때문에 가용한 수질자료 범위 내에서의 수질 농도추정은 오염부하 계산에 미치는 영향이 상대적으로 미미하기 때문인 것으로 판단된다. 추정방법 중에서 어느 방법이 가장 적합한가를 파악하기 위해서 보다 세밀히 결측구간의 오염부하량만 시기별로 나타내었다(Fig. 11). 4.1절에서 설명한 바와 같이, 오염부하량과 수량은 상관성이 있다는 사실을 알았고, 결측구간 중에서 수량이 많아지는 시기(7/16~7/19, 7/28~7/29)에 수질항목의 오염부하량도 마찬가지로 커지는 경향을 나타내고 있다. 7가지 추정방법에 따라 결측구간만을 나타낸 Fig. 11에서도 어느 추정방법이 적절하다고 설명하기 보다는 7가지 추정방법 모두가 비슷한 양상을 보여주고 있다.

7가지 추정방법에 따라 결측구간의 수질농도를 추정하여

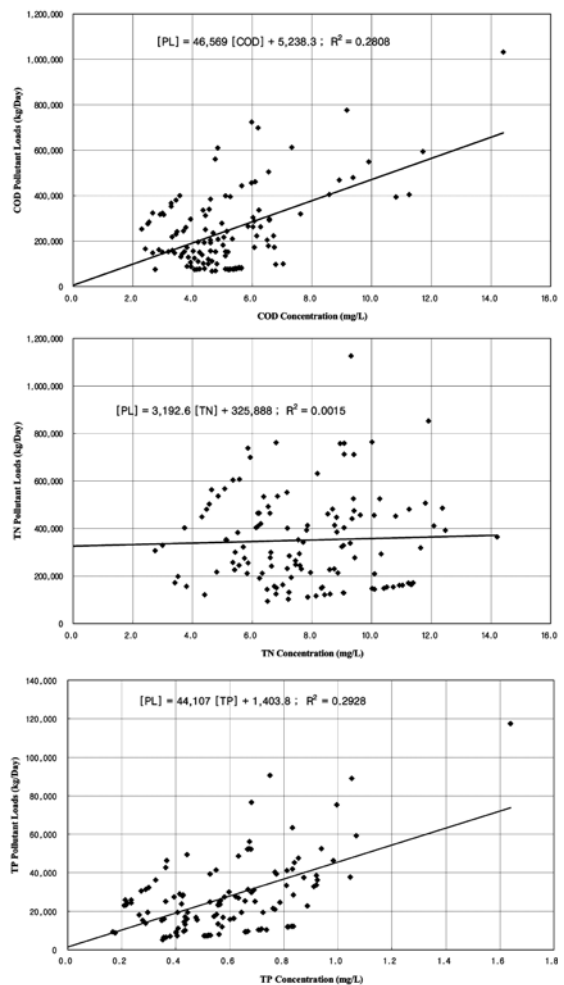


Fig. 9. Scatter diagram in pollutant load and water quality data before estimation.

COD, TN 및 TP의 오염부하량과 수량, 수질과의 상관관계를 나타내었다(Table 3). 오염부하량과 수량과의 상관계수가 오염부하량과 수질의 상관계수보다 훨씬 크다는 사실을 제시하고 있다. 따라서 오염부하량은 수질보다 수량과의 밀접한 영향으로 수량자료에 중점을 두어 추정하는 것이 바람직한 방법으로 사료된다. 오염부하량과 수량과의 상관관계가 7가지 추정방법을 통해서 제시된 결과, 추정방법 모두 상관정도가 매우 높아서 오염부하량을 산정하는데 있어서 어느 추정방법이 가장 적절한 방법인지 파악하기 어렵다. 또한, 오염부하량과 수질의 상관성을 7가지 추정방법을 통해서 상관성을 분석한 결과, 상관정도가 매우 낮다는 사실을 파악하였다. 특히, 추정 전 COD와 TP의 오염부하량과



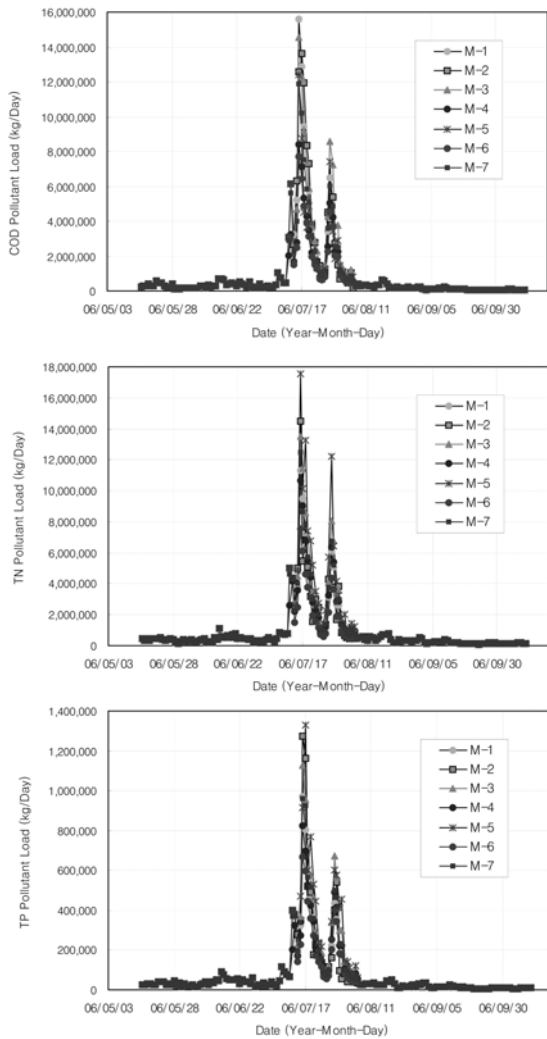


Fig. 10. Pollutant load variation pattern due to estimation method.

수질의 상관계수는 오히려 추정 후보다 조금 높다는 결과가 제시되었다.

#### 4.3 결측구간 제외 시 오염부하량 변화

7가지 추정방법을 통해서 결측구간의 수질농도를 추정하여 총오염부하량을 계산한 결과와 결측구간을 제외하고, 무시하여 총오염부하량을 계산한 결과(M-8)를 비교하여 제시하였다(Table 4). 추정방법 중에서 COD, TN 및 TP의 총오염부하량은 가용한 관측자료를 이용하여 추정하는 방법(M-6, 환경부 월자료 이용)이 가장 낮게 나타났다. 추정된 최소치 COD 총오염부하량(M-6)과 결측구간을 제외하고 산정한 총오염부하량(M-8)과의 차이에 의한 총오염부하량이

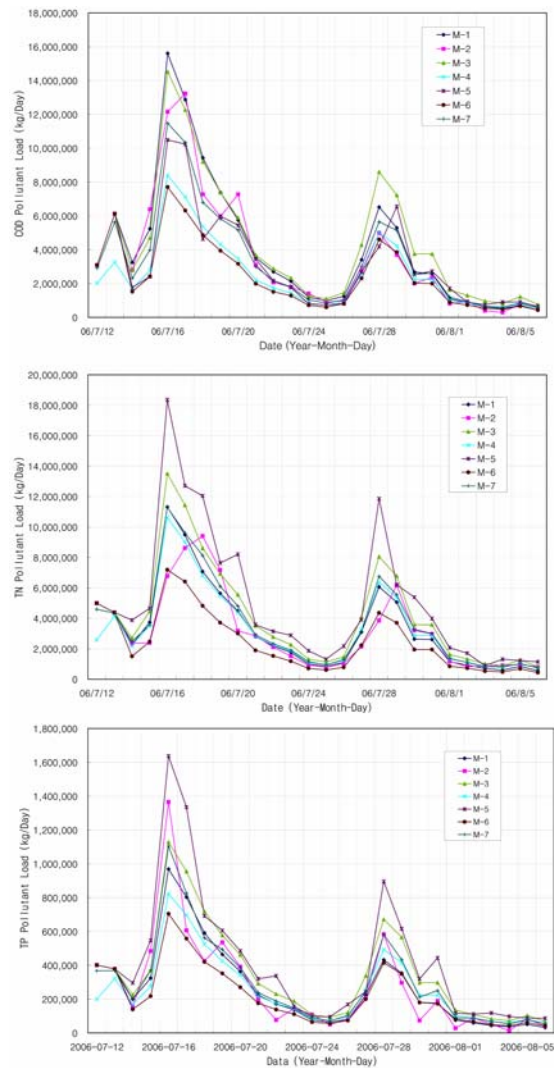


Fig. 11. Pollutant load changes by the estimation method (Data Missing Periods).

결측구간을 제외하고 산정한 총오염부하량 보다 약 2배 정도 많기 때문에 결측구간을 제외하고 총오염부하량을 산정하는 방법으로 총오염부하량을 나타내는 것은 적절한 방법이 아니라고 판단된다. 추정방법에 따라 총오염부하량의 변화는 있겠지만, 결측구간을 제외하고 총오염부하량을 산정하는 방법보다 결측구간을 포함하여 추정함으로써 총오염부하량을 산정하는 방법이 현실적으로 총오염부하량을 추정하는데 있어서 보다 바람직할 것으로 사료된다.

#### 4.4 수량 변동범위와 수질 변동범위 분석

수정된 선형보간방법을 기준으로 수량 및 수질농도의 최

**Table 3.** Coefficient of Determination in before and after Estimation (water quality-pollutant load ; flow discharge-pollutant load)

	water quality-pollutant load correlation			flow discharge-pollutant load correlation			
	COD	TN	TP	COD	TN	TP	
before Estimation	0.2808	0.0015	0.2928	0.5031	0.6317	0.3813	
M-1	0.0055	0.1159	0.0254	0.9383	0.9282	0.9424	
M-2	0.0680	0.0642	0.0071	0.9749	0.9789	0.9599	
M-3	0.0621	0.0200	0.0013	0.9552	0.9330	0.8753	
after estimation	M-4	0.0838	0.0226	0.0000	0.9954	0.9903	0.9877
M-5	0.0105	0.0969	0.0247	0.9922	0.9954	0.9873	
M-6	0.0161	0.0131	0.0093	0.9504	0.9578	0.9798	
M-7	0.0036	0.0984	0.0333	0.9870	0.9852	0.9750	
M-8	0.2808	0.0015	0.2928	0.5031	0.6317	0.3813	

**Table 4.** Total pollutant load including data missing periods

Method	Totally pollutant load in measurement periods (kg/day)		
	COD	TN	TP
M-1	135,364,642	130,517,854	10,272,590
M-2	138,995,965	126,852,542	10,762,734
M-3	143,091,187	151,244,827	12,352,179
M-4	97,122,733	128,767,348	9,986,044
M-5	114,058,996	163,764,931	13,227,034
M-6	94,101,012	106,683,945	9,097,012
M-7	119,852,534	135,485,753	10,929,830
M-8	30,078,958	43,144,426	3,358,368

소값과 최대값을 파악하여 최소기준 변화율(최대값/최소값)을 제시하였다. M-2 방법을 기준으로 변동범위를 분석하는 이유는 앞에서 설명된 바와 같이, 결측구간의 수질농도를 추정하는 방법 중에서 수질농도를 현실적으로 가장 적절하게 재현하기 때문이다(3.2절). 수량과 결측구간을 포함한 수질자료 각각 149개 중에서 통계적 분포인  $p$ 분위수( $p$ th- Percentile : 변량  $X$ 의  $n$ 개의 관측값을 작은 쪽으로부터 크기순으로 배열했을 때 전체 관측값을  $p$ 등분하는 위치에 오는 값) 5%,

10% 및 25% 기준으로 변동범위를 나타내었다. 분위수가 5% 일 때, 각각 최소 2.5% 최대 2.5%로 수량 및 수질자료를 배제하였고, 10% 일 때는 각각 최소 5.0% 최대 5.0%로 수량 및 수질자료를 배제하였으며, 25% 일 때는 각각 12.5%로 수량 및 수질자료를 배제하였다.

수량 변동범위가 수질 변동범위보다 매우 큰 경우(10배 이상)는 수량주도형으로 파악되며, 마찬가지로 수질 변동범위가 수량 변동범위보다 매우 큰 경우(10배 이상)는 수질 주도형으로 파악된다. 한편, 수량 및 수질 변동범위가 대등한 경우에는 혼합형으로 구분될 수 있다. 본 연구에서 수행한 한강 하구의 오염부하 추정은 분위수가 5% 기준과 10% 기준일 때, 수량의 변동범위가 수질의 변동범위보다 20 배 이상이며, 25% 기준일 때는 7배 이상으로 파악되어서 수량주도형으로 판단된다. 따라서, 오염부하는 정확하고 연속적인 수량과 수질관측자료를 이용하여 추정하는 것이 가장 바람직한 방법이나, 실질적으로는 매우 빈번하게 수량 또는 수질관측과정에서 결측이 발생하기 때문에 적절한 관측자료의 추정이 불가피한 실정이다. 특히, 수질 연속 관측 자료의 결측은 매우 빈번하기 때문에 오염부하 추정에 수

**Table 5.** Comparison of variation range in flow discharge and water quality

Constituent	Min. value ~ Max. value (Min. Standard of variation ratio)	5% Standard (Max., Min. 2.5% each data exclusion)	10% Standard (Max., Min. 5.0% each data exclusion)	25% Standard (Max., Min. 12.5% each data exclusion)	Average standard of variation range (10% data)	
Flow Discharge	164~24,362 (148.4)	165~15,496 (93.92)	166~9,970 (60.06)	176~2,578 (14.65)	average 1,761 (0.09~5.66)	
Water Quality	COD	2.01~14.41 (7.17)	2.50~11.26 (4.50)	2.67~9.17 (3.43)	3.32~7.04 (2.12)	average 5.23 (0.51~1.75)
	TN	2.75~14.21 (5.17)	3.19~12.37 (3.88)	3.41~11.64 (3.41)	4.64~10.32 (2.22)	average 7.35 (0.46~1.58)
	TP	0.09~1.64 (18.22)	0.17~1.05 (6.18)	0.21~0.94 (4.48)	0.28~0.83 (2.96)	average 0.54 (0.39~1.74)

**Table 6.** Characteristics division in water area with pollutant load using contribution factor

Range in contribution factor ( $R_{QC}$ )	Type of the PL characteristics	Estimation method in pollutant load
$R_{QC} > 10$	discharge-dominated	focused on flow discharge
$3 < R_{QC} < 10$	moderately discharge-dominated	less focused on flow discharge
$1/3 < R_{QC} < 3$	discharge-water quality balanced	equally-dominated flow discharge & water quality
$1/10 < R_{QC} < 1/3$	moderately water quality-dominated	less focused on water quality
$R_{QC} < 1/10$	water quality-dominated	focused on water quality

량과 수질이 미치는 상대적인 영향을 고려하여 추정할 필요가 있다. 즉, 수량이 주도적인 지점에서는 수질자료가 부족하다 하더라도 오염부하에 미치는 상대적인 영향은 미미할 것이나, 수질 주도형인 경우에는 수질자료의 결측은 매우 치명적인 오차를 유발할 수 있기 때문에 결측을 최소화하는 작업에 중점을 두어야 한다. 본 연구에서는 오염부하 추정에 영향을 미치는 수량 및 수질의 상대적인 변동 범위를 고려한 오염부하 영향인자( $R_{QC}$ )를 제시하였다(Table 6). 이 영향인자에 의하면 한강하구는 수량주도형으로 판단된다.

### 5. 결론 및 제언

연속적인 오염부하 추정은 연속적인 수량 및 수질자료를 필요로 하고 있으나, 실질적으로 수질자료에서 결측이 빈번하게 발생하기 때문에 수질자료 결측구간의 자료를 적절하게 추정할 필요가 있다. 본 논문에서는 결측구간의 수질농도를 추정하기 위하여 한강하구의 가용한 수량 및 수질자료에 근거하여 다양한 방법으로 결측구간의 수질농도를 추정하여 오염부하 변동을 분석·비교한 결과, 수정된 선형보간방법(M-2 방법)이 현실적으로 수질농도를 가장 적절하게 재현하는 것으로 파악되었다. 결측구간을 포함하거나 또는 포함하지 않은 경우의 추정된 수질농도와 수량을 이용하여 산정한 오염부하량은 전체적으로 유사한 경향을 제시하였다. 특히, 오염부하량과 수량의 상관성이 오염부하량과 수질의 상관성보다 훨씬 크게 나타나 수량과의 밀접한 연관성을 보여주었다. 또한, 통계적 분포인  $p$ 분위수를 이용하여 수량 및 수질의 변동비율을 산정한 결과, 수량이 수질보다 7~20배 이상 높게 제시되어서 수량주도형으로 판단되었고,  $p$ 분위수의 기준이 높아짐에 따라 수량 및 수질 변동비율의 차이가 점차로 줄어드는 양상을 나타내었다.

추정방법을 분석한 결과, 본 연구에서 수행된 한강 하구의 오염부하량을 추정함에 있어서 결측구간을 제외하여, 계산되는 오염부하량이 결측구간의 수질농도를 추정하여 산정된 오염부하량 보다 현실적으로 훨씬 적었다. 물론, 추정

방법에 따른 오염부하량의 차이는 있었지만, 결측구간을 제외하여 오염부하를 추정하는 방법은 비현실적인 과소추정 결과를 제시하기 때문에 결측구간의 수질농도 추정은 불가피한 과정으로 사료된다. 한편, 오염부하 구역의 특성을 구분하는 영향인자를 제시하였으며, 제시한 영향인자를 이용하여 분석한 결과 한강하구의 오염부하 특성은 수량 강·주도형으로 파악되었다.

다른 지역에서도 수질관측시 이러한 결측구간이 발생되기 때문에 이러한 추정방법을 근거로 하여 다른 하구지역에서의 오염부하량을 추정할 필요가 있다.

### 감사의 글

본 연구는 한국해양연구원 기본연구사업 “하구 관리 및 기능복원 기술 개발(PE-977-01)” 사업의 지원을 받아 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

### 참고문헌

수질오염공정시험방법 (환경부 고시 제2004-188호, 2004. 12. 17).  
 이광우, 남기수, 허형택 (1980). 진해만의 적조 및 오염모니터링 시스템 개발을 위 한 기초연구, 제1차년도 보고서, BSPE 00022-43-7, 한국과학기술연구소 부설 해양개발연구소.  
 이찬원, 권영택 (1994). 마산만 준설에 따른 해양환경 종합 모니터링, 경상남도.  
 조홍연, 강성현, 조범준 (2006). 연안해역의 오염부하량 추정오차 분석, 한국해양·해양공학회 추계학술발표논문집.  
 조홍연, 김창일, 이달수 (2004). 강릉 신리천의 수량·수질 분석 및 오염부하량 추정, 한국해양·해양공학회지, 제16권, 제4호, pp. 196-205.  
 조홍연, 조범준 (2006). 시화호 및 인천연안의 COD 오염부하량 추정기법, 한국해양·해양공학회지, 제18권, 제3호, pp. 262-67.

- 조홍연, 채장원 (1993). 진해·마산만의 환경관리를 위한 수질모델링, 한국해양·해양공학회지, 제11권, 제1호, pp. 41-49.
- 조홍연, 채장원 (1998). 진해·마산만의 오염부하량 특성 분석, 한국해양·해양공학회지, 제10권, 제3호, pp. 132~140.
- 환경부 고시, 2006. 5. 11. 오염총량관리계획 수립지침 전부개정 고시, 제2006-69호.
- Cercio, C.F., Noel, M.R. and Kim, S.C. (2004). Three-Dimensional Eutrophication Model of Lake Washington, Washington State, ERDC/EL TR-04-12, US Army Corps of Engineers.
- Di Toro, D.M. and Connolly, J.P. (1980). Mathematical Models of water Quality in Large Lakes, Part 2: Lake Erie, EPA-600/3-80-065, U.S. Environmental Protection Agency.
- Draper, N.R. and Smith, H. (1981). Applied Regression Analysis, Second Edition, Section 3.8, John Wiley & Sons, Inc.
- Kottegoda, N.T. and Rosso, R. (1997). Probability, Statistics and Reliability for Civil and Environmental Engineers, McGraw-Hill.
- Tomann, R.V. and Mueller, J.A. (1987). Principles of Surface Water Quality Modeling and Control, Chap. 1, Harper Collins Publishers.

---

Received December 28, 2006

Accepted February 9, 2007