

통계적 기법을 이용한 경안천 유역의 수질 측정망 구성

Statistical Water Quality Monitoring Network Design of Kyung-An Stream

경민수* · 김상단** · 김형수*** · 박석근****

Kyung, Min Soo · Kim, Sang Dan · Kim, Hung Soo · Park, Seok Keun

Abstract

In this study a statistical water quality monitoring network design of Kyung-An stream is proposed. Water quality data for the design is obtained by QUAL2E model simulation. The observed monthly average water quality data from March to November in Kyung-An stream has been applied to this study. HEC-RAS model is also used for QUAL2E hydraulic parameter estimation. Before QUAL2E water quality parameter estimation, FORA is performed to reduce the number of parameters to be estimated, and then water quality parameters are calibrated with a observed monthly average data. Using these simulated water quality data, the number of gage station and its location are estimated by kriging theory and branch & boundary method. Such a network design is based on two case; average flow and low flow case, respectively. Next, proportional sampling method is applied to estimate the sampling frequency.

Keywords : *banch and boundary method, FORA, kriging, network design, proportional sampling method*

요 지

본 연구에서는 통계를 이용한 경안천유역의 최적 수질 측정망 구성이 제안된다. 분석을 위해서 필요한 수질 데이터는 QUAL2E 모형을 이용하여 모의하였으며, 경안천 유역의 2000년도 3월부터 11월까지의 월 평균자료를 이용하였다. QUAL2E 모형을 구축하는데 필요한 수리 매개변수는 HEC-RAS 모형을 이용하여 추정하였다. 수질매개변수의 경우 월평균 실측자료를 바탕으로 1차 신뢰성 분석(FORA)를 이용하여 민감도 분석을 실시하여 수질항목별로 민감하지 않은 매개변수를 제외한 후 보정이 이루어진다. QUAL2E 모형의 모의 결과를 바탕으로 크리깅 기법과 Branch and Boundary Method를 이용하여 평수량 일때와 갈수량 일때로 구분하여 관측지점의 개수와 위치가 결정된다. 또한 선정된 지점을 기준으로 proportional sampling method(비례표본추출법)를 이용하여 각각의 지점별 측정 빈도가 제시된다.

핵심용어 : Branch and Boundary Method, 1차 신뢰성 분석, 크리깅, 수질 관측망 구성, 비례표본추출법

1. 서 론

하천의 수질을 관리하는데 있어서 무엇보다도 중요한 것이 신뢰성 있는 수질 자료를 확보하는 것이다. 수문관측 매뉴얼(건설교통부, 2004)에 따르면 수질측정지점은 하천수의 오염 및 용수의 목적에 따라 채수 지점을 선정할 수 있으며 하천 본류와 하천지류가 합류하는 경우에는 합류이전의 각 지점과 합류 후 충분히 혼합된 지점에서 각각 채수하도록 하고 있다. 또한 수질 측정횟수의 경우 일반 수질항목에 대하여 월 1회 이상 측정하도록 하고 있다. 물론 하천의 모든 지점에서 가능한 한 많이 관측하는 것이 가장 바람직하겠지만 수질을 측정함에 있어서는 많은 시간과 경비가 소요되기 때문에 최소한의 인력과 비용을 투입하여 일정 정도의 신뢰성을 가지는 수질 자료를 확보하는 것이 무엇보다 중요하다고

할 수 있다. 그러기 위해서는 일정수준의 신뢰성을 유지하면서 최소한의 측정횟수와 최적화된 측정지점을 선정하는 연구가 선행되어야 할 것이다. 현재까지 수질 측정지점을 선정하기 위한 다양한 연구가 진행되어 왔으며, 지류 수에 의해 비례적으로 배분하는 방법(Sharp, 1972), 수질 측정 목적을 고려하여 유량에 관한 자료를 이용하는 방법(남궁규철, 1992), 상수취수량과 고정오염원 입지현황을 고려하는 방법(최지용 등, 1996), 수질측정의 목적에 따라서 측정 빈도 및 방법을 제시하는 방법(오경두, 1997) 등이 그 것이라 할 수 있다. 하지만 기존의 연구 사례 중에 몇몇 사례가 있기는 하나 수학적으로 접근한 연구사례를 찾아보기는 어렵다. 따라서 본 연구에서는 분산, 유의수준 등 통계적 기법을 수질 관측망을 구성하는데 적용하고자 한다. 수질 관측망 구성에 필요한 수질 데이터를 모의하기 위하여 Environmental

*정회원 · 인하대학교 환경토목공학부 박사과정(E-mail: gigatg@inha.ac.kr)
**정회원 · 부경대학교 환경시스템공학부 전임강사 · 공학박사(E-mail: skim@pknu.ac.kr)
***정회원 · 인하대학교 환경토목공학부 부교수 · 공학박사(E-mail: sookim@mail.inha.ac.kr)
****인하대학교 환경토목공학부 석사과정(E-mail: dicast97@naver.com)

Protection Agency(EPA)에서 개발한 QUAL2E 모형(Brown and Barnwell, 1987)을 이용하였으며 수질 데이터 모의에 필요한 QUAL2E 모형의 매개변수를 추정할 때 발생하는 불확실성을 고려하기 위하여 1차 신뢰성 분석을 이용하여 민감도 분석을 실시하였다. 민감도 분석을 통하여 수질 항목 별로 민감한 매개변수를 선정 한 후 시행착오법을 적용하여 수질 매개변수를 보정하였다. 추정된 매개변수를 이용하여 모형을 구축한 후 수질 측정지점의 수와 위치 및 측정 빈도를 구성하기 위한 수질 데이터를 월별로 모의 하였다. 모의된 수질 데이터를 바탕으로 최적화 기법을 적용하여 민감하게 반응하는 지점 순서로 측정지점을 선정하고 유의수준과 오차한계를 이용하여 각각의 측정지점에 해당하는 월별 측정 빈도를 제시하였다.

2. 배경이론

2.1 1차 신뢰성 분석

1차 신뢰성 분석(First Order Reliability Analysis)에서 모형의 결과를 테일러급수를 이용해 확장할 경우 1차항을 제외 한 나머지 항을 생략하고 계산하며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$C = g(X) + \sum_{i=1}^P (x_i - x_{ij})(\partial g/\partial x_i)_x \quad (1)$$

여기서 C는 수질모형에서의 모의된 부하량이고 $g(\cdot)$ 는 부하량을 모의하기 위한 함수이다. x_i 는 모형의 매개변수 이고 X는 (x_1, x_2, \dots, x_p) 로 이루어진 벡터이며, P는 민감도 분석을 하고자 하는 매개변수의 개수이다. 1차 신뢰성 분석을 수자원 공학에 적용할 경우, 구하고자 하는 부하량의 기댓값은 부하량 모의를 위한 함수식에 해당 매개변수의 평균값이나 중간 값을 적용함으로써 구할 수 있으며, 기대 값과 분산은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$E[C] \approx g(X_m) \quad (2)$$

$$Var(C) = \sigma_c^2 \approx \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^P (\partial g/\partial x_i)_{X_m} (\partial g/\partial x_j)_{X_m} E[(x_i - x_{mi})(x_j - x_{mj})] \quad (3)$$

여기서 σ_c 는 C의 표준편차이고 X_m 은 구하고자 하는 매개변수들의 평균값이다. 변수들 간의 관계가 통계학적으로 독립이라고 가정하면 C의 분산은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Var(C) = \sigma_c^2 \approx \sum_{i=1}^P [(\partial g/\partial x_i)_{X_m} \sigma_i]^2 \quad (4)$$

여기서 σ_i 는 구하고자하는 매개변수 x_i 의 표준편차이다. 1차 신뢰성 분석의 가장 큰 장점은 적용이 매우 간단하다는 것이다. 즉, 변수들의 평균 중심에서 테일러급수가 확장되며, 이때 통계적 1, 2차모멘트와 간단한 계산만이 요구되어 진다는 것이다(식 4). 1차 신뢰성 분석의 이러한 장점 때문에 다양한 수질관련 모형에 적용되고 있다(Burges and Lettenmaier, 1975; Melching and Anmangandla, 1992).

2.2 크리깅 이론

크리깅(Kriging)이론은 분산을 이용하여 시간이나 지역적으

로 분포되어있는 무작위한 특정 값, 함수, 지역변수 를 추정 하는데 매우 유용하게 사용될 수 있다(Matheron, 1971). $Z(x)$ 를 구성하는 과정에서 다음의 조건들을 가정한다. 지역적으로 분포된 변수들이 정상성 가정을 만족한다면 임의의 벡터(h)와 지점(x_1, \dots, x_r)에 대하여 $(Z(x_1), \dots, Z(x_r))$ 와 $(Z(x_1+h), \dots, Z(x_r+h))$ 의 분포는 동일하다. 이때 $x_l, x_l+h \in D(Z)$ ($l=1, \dots, r$)이며, 여기서 $D(Z)$ 는 변수의 범위를 나타낸다.

평균과 공분산이 정상성 가정을 만족하면 즉, 2차 정상성 가정을 만족하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$E\{Z(x)\} = m \\ \{(Z(x) - m)(Z(x+y) - m)\} = C(h) \quad (5)$$

여기서 지역화된 변수의 기댓값과 공분산은 일정하며 이때 C(h)는 공분산 함수이다.

위의 가정들을 이용하면 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$E\{Z(x+h) - Z(x)\} = 0 \\ Var\{Z(x+y) - Z(x)\} = 2\gamma(h) \quad (6)$$

$\gamma(h)$ 는 중간편차 이다. 식 (6)의 첫 번째 가정에서 $E\{Z(h)\}$ 값이 0인 것을 알 수 있으며, 이 가정들은 조금더 일반화 되어 질 수 있다. 예를 들어 경향성이 있을 경우 범용크리깅(Universal Kriging)을 사용할 수 있으며 이때의 식 (6)의 첫 번째 가정은 식 (7)을 통해서 구할 수 있다.

$$E\{Z(x)\} = \sum_{l=0}^k a_l f_l(x) \quad (7)$$

f_l 은 주어진 함수로 거의 대부분 단항식으로 표현되고 a_l 은 추정해야 하는 계수이며 보통의 경우 $f_0(x)=1$ 이다. 본 논문에서는 자료의 경향성이 없다고 가정하였다.

이러한 모든 가정들을 포함하여 크리깅 이론을 이용하여 식으로 표현하면 다음과 같다.

n개의 지점이 있고 그 지점의 위치를 각각 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 이라고 하고 각각의 지점에서의 관측 값을 $Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_n$ 이라고 하면 크리깅 이론의 적용을 위해서 다음 중 하나의 가정을 선택해야 한다.

(a) 지점의 값을 추정할 경우 $t_1, \dots, t_m \in D(Z)$ 이며 $Z(t_1), \dots, Z(t_m)$ 의 값이 추정되어야 한다.

(b) 구역의 값을 추정할 경우 $V_1, \dots, V_m \in D(Z)$ 이며, 각 구역의 값은 식 (8)과 같이 평균값 형태로 추정될 수 있다.

$$Z(V_i) = (1/V_i) \int_{V_i} Z(x) dx \quad (8)$$

크리깅을 이용하여 공간 분포된 값을 추정하는 방법에는 특정 공간내의 한 점을 그 공간의 대표 값으로 가정하여 추정하는 방법(a)과 공간의 평균값을 사용하는 방법 (b)가 있는데 보통 (b)의 경우를 많이 사용하며, 본 연구에서도 (b)의 방법을 사용하였다.

식 (8)을 일반화하여 표현하면 식 (9)와 같으며, 여기서 Z^* 은 추정된 평균값 $\bar{Z}(V)$ 값에 가중치가 적용된 결과로 볼 수 있다.

$$Z^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (9)$$

여기서 λ_i 는 크리깅 계수이며, 크리깅 방법은 다음의 두 가지 조건을 만족해야 한다. (i) 추정된 값은 불편 추정량이어야 한다. 다시말해 $E(Z^*)=E(Z)$ 이어야 하며 이는 제약식 식 (10)을 사용함으로써 해결 할 수 있다. (ii) 또한 추정 값은 최소의 분산 값을 가져야 한다(식 11).

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i - 1 = 0 \quad (10)$$

$$\text{Min} E[(Z^* - \bar{Z})^2] \quad (11)$$

평균제곱오차나 분산의 경우 다음과 같이 표현될 수 있다 (Journal and Huijbregts, 1978).

$$E[(\bar{Z}(V) - Z^*)^2] = -\gamma_{vv} + 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma_{vi} - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j \gamma_{ij} \quad (12)$$

여기서 $\gamma_{ij} = \gamma(\underline{x}_i - \underline{x}_j)$

$$\gamma_{ij} = \frac{1}{|V|} \int_V \gamma(\underline{x}_i - \underline{x}) dx$$

$$\gamma_{vv} = \frac{1}{|V|} \int_V \int_V \gamma(\underline{x} - \underline{x}') dx dx'$$

식 (10)을 제약조건으로 하는 식 (12)의 최소화된 분산은 라그랑주 승수를 이용해서 계산된다.

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j \gamma_{ij} + \mu = \gamma_{vi} \quad (i=1, 2, 3, \dots, n) \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$$

여기서 μ 는 라그랑주 승수이다. 식 (13)을 식 (12)에 대입하면 선형화된 식 (14)를 얻을 수 있으며, 이를 이용하여 분산의 최적해를 얻을 수 있다.

$$E[(Z(V) - Z^*)^2] = \mu + \sum_{j=1}^n \lambda_j \gamma_{vj} - \gamma_{vv} \quad (14)$$

V가 한 점 (t)로 국한되면 γ_{vi} 와 γ_{vv} 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \gamma_{vi} &= \gamma(\underline{x}_i - t) \\ \gamma_{vv} &= \gamma(t - t) = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

크리깅 이론은 미세측 지점의 분산을 구할 수 있을 뿐만 아니라 분산이 최소화 되는 지점을 선정하는데도 사용될 수 있다. 이러한 크리깅방법은 지하수의 운영에 있어서 최적화된 측정망을 구성하는데 적용된 사례가 있다(Hughes and Lettenmaier, 1981; Carrera et al., 1984).

2.3 Branch and Boundary Method

Branch and Boundary Method는 최적화를 위한 탐색기법 중에 하나로 Forgo(1974), Nakamura and Riley(1981)에 의해 연구가 되었다. 본 연구에서는 Branch and Boundary Method를 이용해서 지점을 선정하고 선정된 지점이 제거되었을 경우의 전체분산을 앞에서 설명한 크리깅이론을 이용하여 구하였다. 최적화된 측정지점을 선정하기 위해서 식 (14)를

목적함수로 하고 식 (13)을 제약조건으로 같은 최적화 문제를 풀어야 한다. 일반적인 최적화의 경우 국부최적화를 통해서 최소값이 구해지지만 이 경우는 최소값을 바로 구할 수 없기 때문에 다음과 같은 특별한 방법을 사용해야 한다.

우선 모든 측정지점을 유한개의 요소로 구분하고 최적화된 지점 즉, 제거되었을 경우 전체 분산이 최소화 되는 지점을 행렬 형태의 다음 식들을 이용해서 구해야 한다.

$$\gamma(n, \underline{x}) = \begin{pmatrix} 1 \\ \gamma_{v1} \\ \vdots \\ \gamma_{vn} \end{pmatrix} \quad \underline{G}(n, \underline{x}) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \dots & 1 \\ 1 & \gamma_{11} \dots & \gamma_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \gamma_{n1} & \dots & \gamma_{nn} \end{bmatrix} \quad \lambda(n, \underline{x}) = \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_n \end{pmatrix} \quad (16)$$

제약조건인 식 (13)과 목적함수인 식 (14)를 식 (16)의 행렬을 이용해서 나타내면 다음과 같다.

$$\underline{G} \cdot \lambda(n, \underline{x}) = \gamma(n, \underline{x}) \quad (17)$$

$$\text{Var}(n, \underline{x}) = \gamma(n, \underline{x})^T \cdot \lambda(n, \underline{x}) \quad (18)$$

식 (17)을 식 (18)에 대입함으로써 최종적으로 Branch and Boundary Method의 탐색과정에서 사용되는 식 (19)를 얻을 수 있다.

$$\min\{\text{Var}(n, \underline{x})\} = \gamma(n, \underline{x})^T \underline{G}(n, \underline{x})^{-1} \gamma(n, \underline{x}) - \gamma_{vv} \quad (19)$$

Branch and Boundary Method는 그림 1에서 초기지점 A에서 시작하여 각각의 가치를 따라서 탐색이 진행되며 다음의 절차에 의해서 최소화된 분산을 계산한다(그림 1).

- ① 최초 지점인 A에서 을 제거한 상태에서 크리깅 이론을 이용해서 분산의 최소값을 구한다(A에서 B로 이동).
- ② 탐색 과정에서 한 점을 추가 시키고자 할 경우에는 가치를 통해서 뒤로 움직인다(B에서 A로 이동).
- ③ 탐색과정에서 뒤로 움직이는 경우는 다음과 같다.
 - (a) 예를 들어 G에 있고 A, B, C, D, E, F의 분산 중에서 D가 가장 작은 값을 가졌다고 가정했을때 G의 분산이 D의 분산보다 크다면 H, I, J의 분산은 분명히 D의 분산보다 크기 때문에 계산할 필요가 없다. 이런 경우에는 G에서 H, I, J로 가는 것이 아니라 다시 A로 가야한다. 즉, 1점만을 제거 했을때 구한 분산이 이전 단계에서 구한 가장 작은 분산보다 클 경우는 계산을 하지 않는다.
 - (b) 예를 들어 B의 분산을 계산 한 이후에 C, D, E, F의 모든 분산을 다 구했다면 모든 지점의 탐색을 마쳤기 때문에 뒤로 가야 한다. 즉, 한 지점에서 시작한 탐색이 모든 지점의 탐색을 마쳤을 경우에 탐색을 마친다.

위의 탐색과정은 가능한 모든 경우의 수의 탐색을 마칠 때까지 반복된다. 단 (a)의 경우는 빠른 탐색을 위해서 제외된다. 이는 분산의 경우 지점의 수를 제거할수록 커지기 때문에 G의 분산이 D의 분산보다 클 경우 H, I, J의 분산도 당연히 D의 분산보다 커지기 때문이다.

2.4 비례표본추출법

크리깅이론에 의해서 최적화된 관측지점이 선정된 이후에 각각의 관측지점에 해당하는 측정 빈도를 구해야하며 이 과

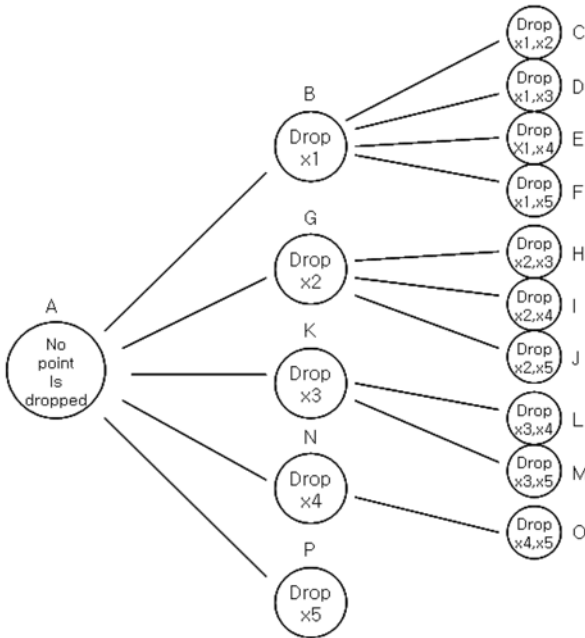


그림 1. Branch and Boundary Method

정에서 비례표본추출법(proportional sampling method)를 사용하였다. 우선 각각의 수질측정 지점에서의 측정값이 정규분포를 따른다고 가정하면 식 (20)과 같이 정규화 하여 나타낼 수 있다.

$$Z = (X - \mu) / \sigma \quad (20)$$

여기서 Z는 정규화된 무작위 값이고, X는 관측 값의 무작위 값이다.

μ 는 평균, σ 는 표준편차이다. 유의수준%를 가지는 정규분포이고 오차한계를 R이라 정의 하면 R은 식 (21)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R = \left(S_x Z_{\alpha/2} \right) / N^{1/2} \quad (21)$$

여기서 S_x 는 표준편차이고, N은 관측지점의 개수이다. $Z_{\alpha/2}$ 는 정규분포의 분산계수이다. 비례표본은 전체 분산에 대한 각각의 지점이 가지는 분산의 상대적 크기에 의해서 구해진 측정 횟수를 말한다. 이는 특정 지점의 분산이 클수록 더 많이 측정해야 하며, 반대로 분산이 작으면 측정 횟수가 적어지는 것을 의미한다.

$$N_i = [S_x^2 / \Sigma S_x^2] T \quad (22)$$

여기서 T는 모든 지점에서의 측정횟수의 총합이며, N_i 는 지점에서의 측정횟수를 말한다. 식 (22)를 식 (21)에 대입함으로써 다음 식을 얻을 수 있다.

$$R = Z_{\alpha/2} (\Sigma S_x^2)^{1/2} / T^{1/2} \quad (23)$$

식 (23)으로부터 유의수준과 오차한계를 고려하여 총 측정 횟수인 T를 구할 수 있으며 구해진 T와 식 (22)를 이용하여 각각의 지점별 측정횟수도 구할 수 있다.

3. 경안천 유역의 적용

대상유역은 경안천 유역으로 경기도 광주시와 용인시를 호

르고 있으며, 총 유역 면적은 561.13 km²이고 유로연장은 47.87 km이다. 경안천 유역은 수도권 상수원인 팔당호로 유입되는 큰 지류 중에 하나이기 때문에 정확한 수질 측정을 통한 오염량 규제가 절실한 곳이라 할 수 있다. 경안천 유역의 수질측정망을 구성하기 위하여 필요한 수질 자료는 QUAL2E 모형을 사용하여 모의하였으며 총 6개 구간으로 유역을 분할하였다.

3.1 수리학적 매개변수 추정

수리 매개변수의 경우 HEC-RAS모형을 이용하여 지점별 수심, 유속, 유량을 산정하였으며 이 자료를 바탕으로 수심-유량 관계식과 유속-유량 관계식을 유도하여 QUAL2E 모형에 필요한 수리학적 매개변수를 추정하였다. 아래의 식은 수심-유량 및 유속-유량관계식을 나타낸다.

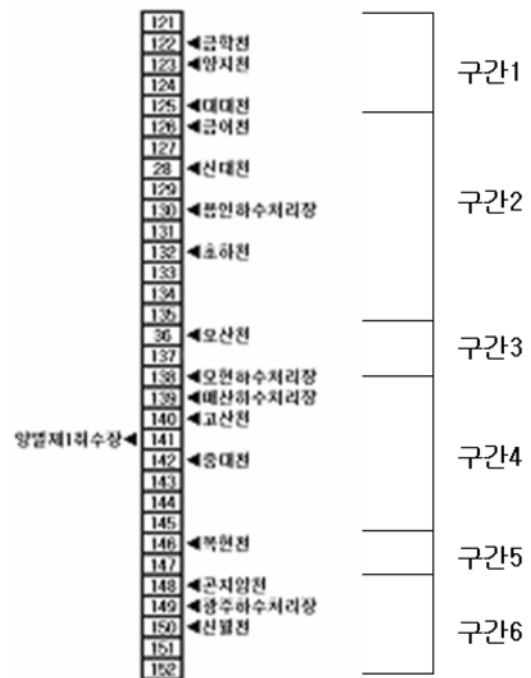


그림 2. QUAL2E 모식도



그림 3. 대상유역도(경안천)

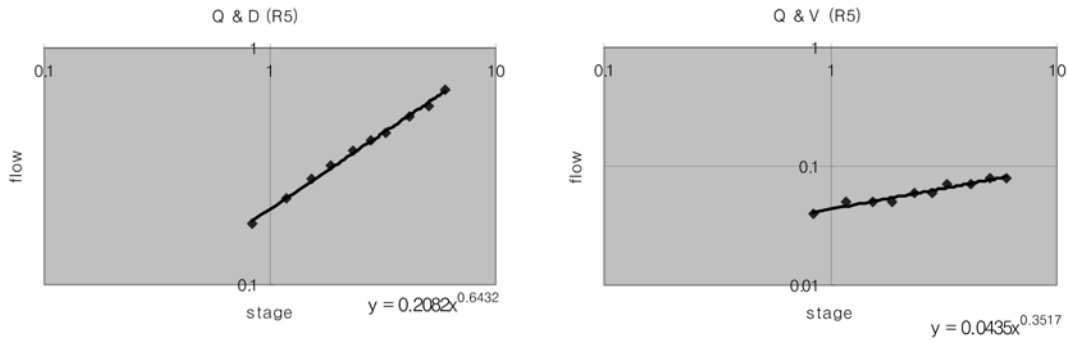


그림 4. 5번구간의 최하류 단면에서의 분석

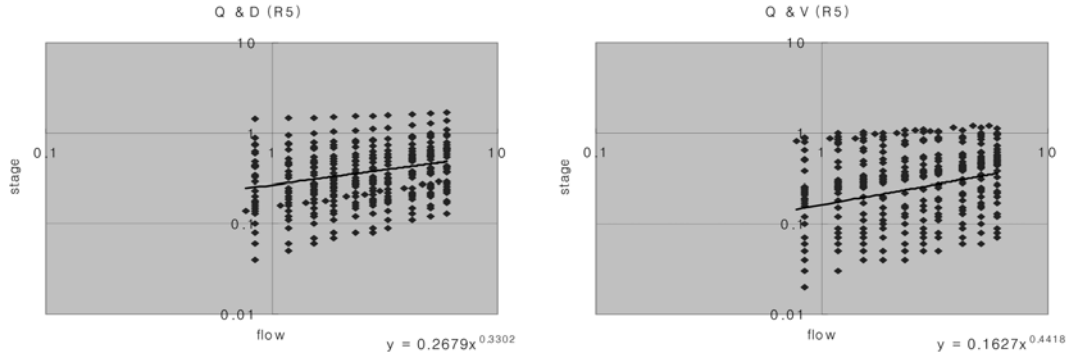


그림 5. 5번구간의 전체단면에서의 분석

$$D = aQ^b \quad (24)$$

$$V = \alpha Q^\beta \quad (25)$$

여기서, D 는 수심(m), Q 는 유량 (m^3/s), V 는 유속 (m/s)이다.

수리학적 매개변수는 구간(reach)별로 추정하게 되는데, 이의 추정 방법에는 구간의 마지막 단면의 수리자료를 사용하는 방법과 모든 단면의 수리자료 평균값을 사용하는 방법이 있다. 기존에는 구간의 마지막 단면의 수리자료를 주로 사용하였으나 본 연구에서는 구간 내 모든 단면의 수리자료 평균값을 사용한 결과를 동시에 산정하여 기존의 방법과 비교 검토 하였다. 그림 4와 그림 5는 5번구간의 수심-유량관계식과 유속-유량 관계식을 각각 나타낸다.

수질의 경우 유량에 영향을 많이 받기 때문에 수리학적 매개 변수를 추정하는 것이 매우 중요하다고 할 수 있다. 또한 하천 수질의 경우 이동시간이 매우 중요하다. 그 이유는 QUAL2E 모형의 수질요소 대부분이 시간에 대한 미분항으로 표현되기 때문이다. 따라서 HEC-RAS가 시간에 따른 수리학적 특성을 잘 반영할 수 있다고 가정했을 경우 두 가지의 방법으로 각각 구한 거리에 따른 이동시간을 HEC-

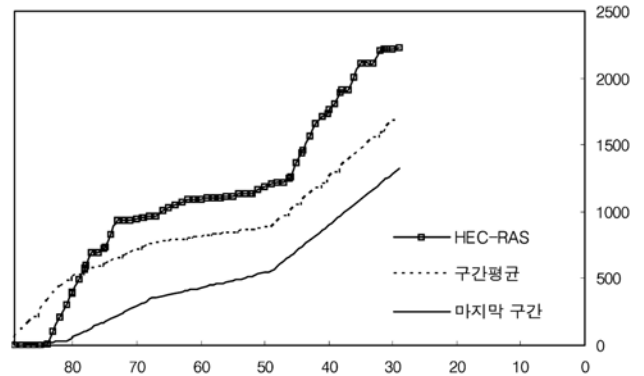


그림 6. 거리에 따른 이동시간

AS의 거리에 따른 이동시간 그래프와 비교함으로써 이동시간을 상대적으로 잘 고려할 수 있는 방법을 선택할 수 있을 것이다. 그림 6에서 보는 바와 같이 구간별 전체단면을 사용하였을 경우가 HEC-RAS의 거리에 따른 이동시간 분포를 상대적으로 더 잘 재현하고 있음을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 구간별 전체단면을 이용하여 수리매개변수를 산정하였으며, 그 결과는 표 1과 같다.

표 1. QUAL2E 모형을 위한 수리 매개변수

	매개변수				
	조도계수(n)	a	b	α	β
1	0.03	0.4500	0.2110	0.3718	0.3684
2	0.03	0.2572	0.2938	0.3817	0.3446
3	0.03	0.0215	0.6101	0.5608	0.3102
4	0.03	0.0544	0.4754	0.5244	0.3422
5	0.03	0.1627	0.4418	0.2679	0.3302
6	0.03	0.0184	0.8529	0.8916	0.1132

3.2 QUAL2E 입력자료 구축

모형의 적용을 위한 유입량 초기 자료로서 QUAL2E모식도 상의 121지점의 유량, 수온 및 수질자료를 사용하였으며, 152지점인 서하교에서 측정된 유량을 대상구역 전체의 유출량으로 가정하고 면적비를 사용하여 각각의 소유역에 해당하는 유량을 산정하였다. 수온의 경우 가용 자료 중에서 대상구역에 해당하는 지점의 월 평균 수온을 이용하였다. 모형의 입력에 필요한 부하량 자료를 얻기 위하여 최근 2년간의 경안천유역자료를 이용하였으며 금학천, 양지천, 금어천, 신대천, 오산천, 경안천03-1, 중대천, 목현천, 곤지암천, 신월천으로 소유역을 구분하고 각각 소유역에 해당하는 유달율을 월별로 구하였다.

유역의 오염 부하량은 크게 발생부하량, 배출부하량, 유달부하량으로 나누어진다. 여기서 발생부하량 이라 함은 점오염원 및 비점오염원으로부터 발생하는 오염물질의 양을 말하며, 이는 그 지역의 가축 수, 인구 수 등을 이용하여 구할 수 있고 배출부하량은 발생부하량이 처리과정을 거쳐 삭감되었거나 처리과정을 거치지 않고 직접 공공수역으로 배출되었을 때 오염물질의 양을 말한다. 마지막으로 유달부하량은 소유역의 배출부하량이 공공수역의 자정작용, 조류성장 등 물질변화과정을 거친 후 유역의 하단지점에 도달 되었을 때 오염물질의 양을 말한다. 유달율은 유달부하량과 배출부하량의 비를 말하며 유달율을 이용하여 소유역내에서오염물질이 하천을 따라 이동하였을 때 하천 수질의 변화 정도를 예측할 수 있으므로 미계측 유역에서의 QUAL2E 자료를 구축하기 위하여 유달율을 이용하는 것이 가능하다. 유달율을 계산하는 방법에는 크게 1) 토양의 유달율을 이용하는 방법 2) 합리식의 유출계수를 이용하는 방법 3) 통계자료를

표 3. 매개변수 변동계수

Parameters	COV	매개변수 범위
K_1	0.198	0.02~3.4
K_3	0.200	-0.36~0.36
σ_4	0.196	0.001~0.1
β_1	0.164	0.1~1
β_2	0.164	0.2~2
β_3	0.181	0.02~0.4
σ_5	0.196	0.001~0.1
β_4	0.194	0.01~0.7
ρ	0.164	0.05~0.5
μ_{max}	0.100	1~3

이용하는 방법 4) 실측자료를 이용하여 직접비교하는 방법 등(손명기 등, 1995)이 있다. 본 논문에서는 경안천 유역의 가용한 실측자료를 사용하여 유달율을 계산하여 사용하였다. 유달부하량 자료가 있는 계측유역의 경우 실측자료를 이용하여 구한 유달율과 면적비 유출량을 이용하여 수질항목의 부하량을 산정하였다. 반면에 미계측유역의 경우 크기가 비슷한 인근 유역과 유달율이 같다고 가정하여 계측유역과 같은 방법으로 부하량을 산정하였다. QUAL2E모의 항목은 BOD, DO, ORG-N, NH₃, NO₂, NO₃, ORG-P, DIS-P로 총 8개 항목을 모의하였다.

3.3 수질 매개변수의 민감도 분석 및 추정

수질 매개변수를 추정함에 있어서 불확실성을 고려하기 위하여 1차 신뢰성 분석을 이용하여 매개변수의 민감도 분석

표 2. 실측 자료 현황

소유역	배출부하량	유달부하량	소유역	배출부하량	유달부하량
금학천	√	√	경안천03-1	√	√
양지천	√	√	고산천	√	
대대천	√		중대천	√	√
금어천	√	√	목현천	√	√
신대천	√	√	곤지암천	√	√
초하천	√		신월천	√	
오산천	√	√			

표 4. 수질항목별 매개변수의 민감도

매개변수	DO	BOD	ORG-N	NH ₃	NO ₂	NO ₃	ORG-P	DIS-P
K_1	11.00	99.84	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0
K_3	0.00	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0
β_3	45.66	0.00	91.26	59.00	24.70	30.33	0.00	0
σ_4	1.11	0.00	8.74	1.10	0.84	1.07	0.00	0
β_1	41.60	0.00	0.00	39.91	25.29	46.00	0.00	0
σ_3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0
β_2	0.63	0.00	0.00	0.00	49.17	22.59	0.00	0
β_4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	65.86	100
σ_5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	34.14	0
σ_2	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0

을 실시하였다. 민감도 분석과정에서 분산의 계산을 위하여 필요한 변동 계수는 김정섭 등(2004)이 제시한 값을 사용하였으며(표 3), 평균값은 각각 매개변수의 범위 중에서 중간값을 사용하였다.

1차 신뢰성 분석을 이용한 민감도 분석을 할 때 수질 자료의 변화량을 산정하기 위한 매개변수의 값을 5%씩 증가시켰다. 매개변수를 추정하는데 있어서 5%의 증가값을 사용하는 것은 QUAL2E-UNCAS모형의 불확실성을 분석하는 과정에서 Brown and Barnwell (1987)에 의하여 제안되었다. 매개변수를 증가시킴에 따라 각각의 수질항목에 미치는 영향을 계산하여 표 4와 같이 상대적인 백분율로 나타내었다.

분석결과 β_1 과 β_3 가 DO에 상당한 영향을 주는 것으로 파악되었으며, 모든 질소계열의 수질요소들은 에 상당한 영향을 받는 것으로 나타났다. 또한 σ_2 와 σ_3 의 경우 BOD, DO, 질소계열, 인계열의 수질요소에는 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있었다.

민감도 분석을 토대로 하여 4월달 수질자료를 이용하여 시행착오법으로 QUAL2E 모형의 매개변수를 추정하였으며 가장 민감한 매개변수를 우선적으로 추정하였다. 선정된 매개변수가 다른 수질 요소에도 영향을 주는 경우에는 이미 선정된 수질요소에 최소한으로 영향을 미치는 범위 내에서 매개변수를 다시 추정하였다. 다음 표 5는 선정된 매개변수와 각각의 매개변수에 가장 영향을 많이 받는 수질 요소의 매개변수의 보정 결과와 이때의 RMSE를 보여준다. NH₃의 경우 RMSE가 상당히 크게 나오는 것을 알 수 있다. 이는 QUAL2E 모형을 구축하는 과정에서 점오염원으로 가정된 하수처리장에서 배출되는 NH₃의 부하량이 너무 크기 때문에 QUAL2E모형이 이를 잘 반영하지 못했기 때문인 것으로 판단된다.

표 5. 매개변수 추정 결과

매개변수	수질요소	RMSE	결과
K_1	BOD	3.711374	0
K_3	DO	1.564129	0
β_3	NH ₃	6.912861	0.02
σ_4	ORG-N	2.779708	1.15
β_1	NO ₃	0.746799	0
β_2	NO ₂	0.029467	1.54
β_4	DIS-P	0.551275	0.17
σ_5	ORG-P	1.063628	0.001

3.4 관측지점 선정

민감도 분석과 시행착오법을 통해서 추정된 매개변수를 가지고 3월부터 11월까지의 수질을 모의하였다. 최적화된 측정 지점을 산정하기 위해서 우선 측정 지점의 개수를 산정하였다. 측정지점의 개수는 평수량 일때와 갈수량 일때로 나누어 지점의 개수를 늘려가면서 분산이 어느 수준 이상으로 감소 되었을 때의 지점의 개수를 선택하였다.

그림 8에서 보는바와 같이 DO, NO₂, NO₃, ORG-P의 경우 분산이 감소하다가 10개 지점을 전후로 하여 분산이 거의 0에 가깝게 되는 것을 알 수 있다. 반면에 BOD, ORG-N, NH₃, DIS-P의 경우는 지점수가 증가할수록 꾸준히 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 15개 지점을 평수량 일때 최적지점 개수로 결정하였다.

또한 그림 9를 보면, DO의 경우 분산이 감소하다가 10개 지점을 전후로 하여 분산이 거의 0에 가깝게 되는 것을 알 수 있으며 NO₂, NO₃의 경우 20개 지점부터 거의 0에 가까운 것을 알 수 있다. 반면에 BOD, ORG-N, NH₃, DIS-

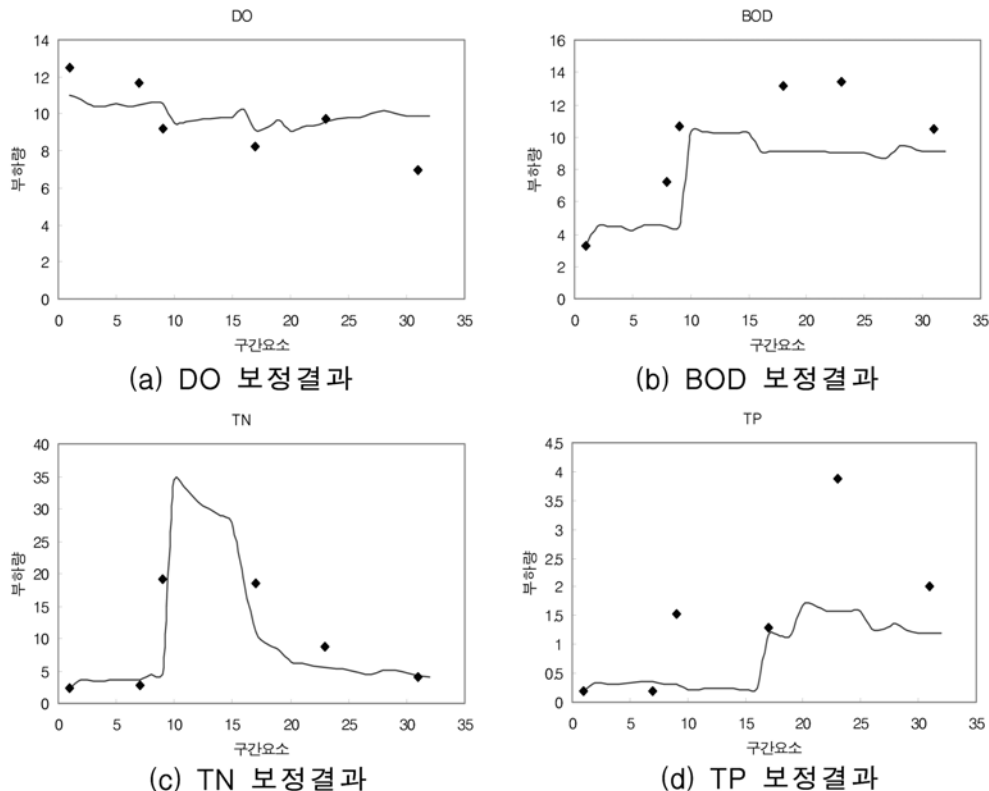


그림 7. QUAL2E 보정 결과

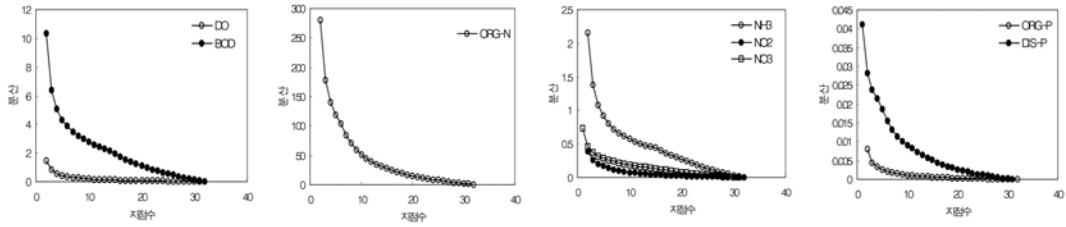


그림 8. 지점수에 따른 분산 - 평수량

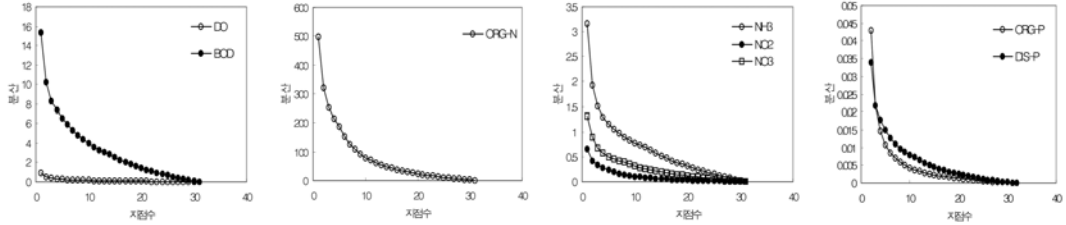


그림 9. 지점수에 따른 분산 - 갈수량

P, ORG-P의 경우는 지점수가 증가 할수록 꾸준히 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서 갈수량의 경우 본 연구에서는 23 개 지점을 최적지점수로 결정하였다.

다음으로는 크리깅기법과 Branch and Boundary Method 를 이용하여 최적화된 측정 지점을 결정하였으며 그 절차는 다음과 같다.

Branch and Boundary Method를 이용하여 탐색경로를 선정하고 전체 지점에서 선정된 지점들을 제거해 가면서 크리깅이론을 이용하여 선택된 지점이 제거 되었을 경우의 최소화 된 분산을 구하였다. 구해진 분산 중에서 가장 작은 분산을 가지는 지점이 최종적으로 제외되고 다시 처음부터 탐색을 시작하여 두 번째 지점을 선정하여 제거 하였다. 이런 과정을 모든 지점이 제거 될 때까지 반복 시행하여 유역에서 가장 민감하게 반응하는 지점을 평수량일때 와 갈수량일 때로 나누어 각각 15개 지점과 23개 지점을 우선순위를 두어 선정하였으며, 그 결과는 표 6 및 표 7에 나타내었다. 지점을 우선순위로 나열한 것은 측정지점에 대한 접근성이나 예산확보상황 등 수질 관측을 위한 제반 여건을 고려하여 측정지점을 임의로 설정할 수 있게 하기 위함이다. 예를 들어 하천의 월 평균 유량이 평수량 수준 일때 하천의 BOD 부하량이 급격히 높아진 것에 대한 원인을 찾고자 할 경우 32번 지점, 11번 지점, 22번지점, ..., 30번지점의 순으로 접근성이나 인근여건 등을 고려하여 수질을 측정한다면 원인을 상대적으로 쉽게 찾을 수 있을 것이다. 또한 하천전

표 6. 평수량일때 측정 지점

	관측 지점 (15개)
DO	32, 12, 31, 20, 2, 25, 7, 15, 28, 4, 17, 9, 22, 30, 26
BOD	32, 11, 22, 31, 2, 17, 7, 26, 14, 4, 20, 28, 9, 24, 30
ORG-N	32, 21, 8, 31, 13, 1, 26, 18, 5, 11, 24, 29, 16, 3, 7
NH3	32, 12, 31, 20, 2, 25, 7, 15, 28, 4, 17, 9, 22, 30, 26
NO2	32, 12, 31, 20, 2, 25, 7, 15, 28, 4, 17, 9, 22, 30, 26
NO3	32, 8, 28, 15, 23, 2, 19, 31, 11, 5, 25, 21, 17, 13, 30
ORG-P	32, 12, 31, 20, 2, 25, 7, 15, 28, 4, 17, 9, 22, 30, 26
DIS-P	32, 21, 8, 31, 13, 1, 26, 18, 5, 11, 24, 29, 16, 3, 7

체의 수질을 관리하기 위한 수질측정지점을 선정할 경우에도 하천전체의 수질에 대하여 민감하게 반응하는 지점부터 수질 측정지점을 선정하는 것이 가장 효율적일 것이다.

표 6과 표 7에서 DO, BOD, N계열, P계열 수질항목에 대한 각각의 관측지점을 선정하였다. 그러나 현실적으로 수질항목을 측정할 경우 한 지점에서 모든 수질항목을 측정하게 된다. 따라서 평수량의 경우 8개 수질 항목을 모두 측정해야 하는 지점과 7개 수질항목을 측정해야 하는 측정지점까지를 선정하였으며, 갈수량의 경우 위의 결과를 중심으로 모든 수질항목이 공통적으로 측정되는 지점을 선정하였다(표 8). 갈수량일 경우 선정된 관측지점을 앞의 그림 3에 표시하였다.

표 7. 갈수량일때 측정 지점

	관측 지점 (23개)
DO	32, 12, 31, 20, 2, 25, 7, 15, 28, 4, 17, 9, 22, 30, 26, 14, 6, 18, 23, 10, 1, 29, 11
BOD	32, 9, 27, 16, 2, 21, 31, 6, 13, 24, 18, 29, 11, 4, 20, 23, 15, 26, 7, 30, 1, 12, 5
ORG-N	32, 20, 11, 31, 4, 26, 16, 8, 23, 2, 14, 28, 6, 18, 30, 24, 13, 21, 10, 1, 17, 5, 29
NH3	32, 12, 31, 20, 2, 25, 7, 15, 28, 4, 17, 9, 22, 30, 26, 14, 6, 18, 23, 10, 1, 29, 11
NO2	32, 12, 31, 20, 2, 25, 7, 15, 28, 4, 17, 9, 22, 30, 26, 14, 6, 18, 23, 10, 1, 29, 11
NO3	32, 18, 5, 28, 10, 23, 14, 31, 2, 20, 25, 8, 16, 12, 30, 4, 26, 7, 22, 1, 29, 11, 13
ORG-P	32, 12, 31, 20, 2, 25, 7, 15, 28, 4, 17, 9, 22, 30, 26, 14, 6, 18, 23, 10, 1, 29, 11
DIS-P	32, 25, 5, 18, 11, 31, 1, 14, 21, 28, 8, 3, 16, 23, 30, 12, 26, 9, 20, 6, 29, 15, 17

표 8. 관측 지점

	관측 지점
평수량	7,26,31,32
갈수량	1,11,18,20,23,26,29,30,31,32

현재 경안천 유역의 경우 그림 3에서 보는 바와 같이 3개의 관측지점이 있다. 따라서 본 연구의 결과와 비교하여 본다면 수질데이터의 신뢰성을 높이기 위해서는 평수량일 경우에는 1개, 갈수량일 경우에는 7개의 관측지점이 더 필요할 것으로 생각된다.

3.5 측정 빈도 선정

선정된 측정 지점을 중심으로 비례표본추출법을 이용하여 측정 빈도를 산정하였다. 측정횟수를 모의 하기 위해서는 우선 유의수준과 신뢰구간을 정하였다. 본 연구에서는 유의수준을 2%, 5%, 10%, 20%로 변화 시키면서 동시에 오차범위를 ppm 기준으로 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.6, 1로 변화하는데 따른 각각의 수질 요소별 측정횟수를 산정 하였다. 측정횟수는 유의수준이 감소할수록, 오차범위가 작을수록 증가하였다. 측정횟수가 너무 많으면 경제적이 못하게 되고 그 반대의 경우는 데이터에 대한 신뢰도가 떨어지게 된다. 본 연구에서는 유의수준은 10%로하고 오차범위는 수질요소에 따라서 차등 적용하였다. 적용결과 평수량일 경우 1~3회, 갈수량일 경우 2~4회 측정하는 것이 가장 적절한 것으로 분석되었다.

BOD, DO, NH₃, NO₃의 경우 평수량일때 보다 갈수량일 때 측정 빈도가 상대적으로 크게 나왔다. 그러나 NO₂, ORG-P, DIS-P의 경우 평수량일때는 측정 빈도가 전반적으로 고르게 분포하였으나 갈수량일때는 상류부에서 측정 빈도가 매우 크게 계산된 것을 알 수 있다. 이는 비례표본추출법의 경우 전체지점의 분산에서 그 지점이 차지하는 분산

정도를 나타내는데 갈수량일 경우 상류부분의 변동 폭이 매우 심하여 측정 빈도가 상류부에 집중되기 때문에 하류부분의 측정 빈도가 상대적으로 적게 나오게 되는 것이며 이에 대한 보완이 필요할 것이다.

본 연구에서 제시된 측정 빈도가 절대적인 것은 아니다. 측정 빈도의 경우 유의수준과 오차범위에 따라서 각각 다른 결과를 경우 보여주기 때문에 이 방법을 다른 유역에 적용하고자 할 경우 유역의 특성 등을 감안하여 오차범위나 유의수준을 적절히 조정하여 사용하는 것이 가능할 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 경안천 유역을 대상으로 해서 DO, BOD, ORG-N, NH₃, NO₂, NO₃, ORG-P, DIS-P의 부하량을 모의하고 이를 이용해서 측정점의 개수와 측정지점 그리고 유량에 따른 최적화된 측정 빈도를 제시하였다. 그러나 갈수량의 경우 측정 빈도를 계산할 때 특정 지역으로 측정횟수가 매우 크게 산정되었다. 이는 특정 부분의 오염 부하량이 지나치게 크기 때문이다. 또한 본 연구의 결과를 하천의 특정 수질항목이 급격히 나빠진 것에 대한 원인을 찾고자 할 경우 수질에 가장 민감하게 반응하는 지점부터 조사한다면 상대적으로 쉽게 원인을 분석하고 해결책을 찾을 수 있을 것이다. 본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. Qaul2e 모형의 구축을 위하여 수리매개변수를 HEC-RAS를 이용하여 추정할 경우 수심, 유속, 유량 자료는 구간의 모든 단면 평균값을 사용하는 것이 거리에 따른 이동속도의 변화를 잘 표현하며, 이는 수질모의에서 중요한 요소 중에 하나이다.
2. 미계측 유역의 유달부하량의 경우 유역면적이 비슷한 계측유역의 유달율과 동일하다고 가정하여 가정된 유달율에 배출 부하량을 곱함으로써 구할 수 있었다.
3. 수질 모형의 매개변수를 보정하는 과정에서 민감도 분석

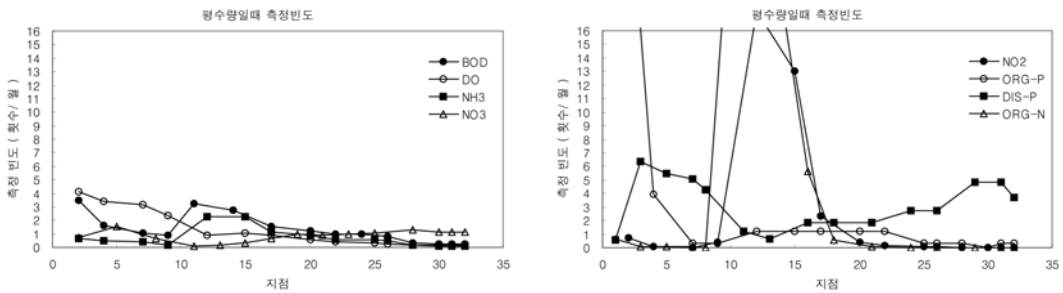


그림 10. 평수량일때 지점별 측정 빈도

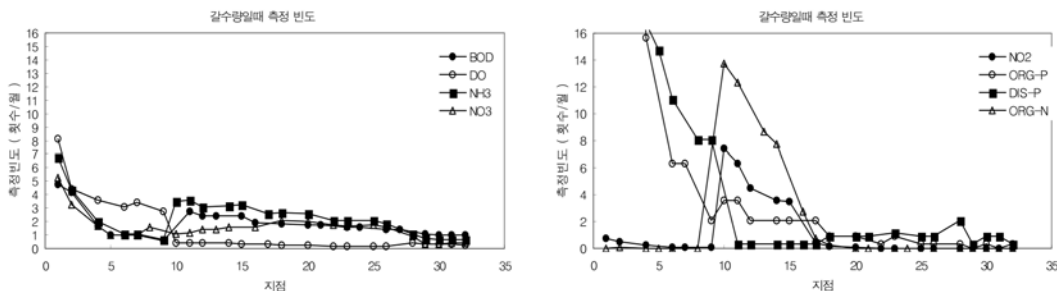


그림 11. 갈수량일때 지점별 측정 빈도

을 통하여 불확실성을 고려한 상태에서 매개변수를 추정할 수 있었다.

4. 분석적 기법인 크리깅 기법과 최적화 기법인 Barnch and Boundary Method를 이용하여 최적화된 수질 측정 지점을 제시하였으며, 그림 3에서 보는 바와 같이 갈수량일 경우 기존의 관측지점 보다 많은 관측지점이 필요함을 확인할 수 있었다.
5. 수질데이터의 신뢰성을 높이기 위해서는 평수량일 경우에는 1개, 갈수량일 경우에는 7개의 관측지점이 더 필요할 것으로 생각된다.
6. 측정 빈도의 경우 대부분 갈수량일때가 평수량일때 보다 측정 횟수와 측정 빈도가 모두 크게 나왔다. 이는 수량이 적을수록 지점별 분산이 커지게 되므로 더 많은 지점에서 측정을 해야 하며 측정 횟수도 더 많이 해야 한다는 것을 뜻한다.

본 연구의 결과와 하천의 접근성 등을 고려하여 측정지점을 선정한 연구 결과를 종합하여 측정지점을 제시하는 것이 가능할 것으로 생각된다. 서론에서도 언급하였듯이 최근 수질오염에 대한 관심이 커지면서 정확하게 수질을 측정하는 것이 무엇보다도 중요한 사안이 되었다. 하지만 수질을 정확히 측정하는 것도 중요하나 최소의 비용으로 신뢰할 수 있는 수질 데이터를 측정하는 것이 더 중요하다고 할 수 있을 것이며, 이런 의미에서 본 연구에서는 일정한 신뢰수준을 유지하면서 유역을 대표하는 수질을 측정할 수 있는 최적 지점과 빈도를 제시했다는데 의의가 있다고 볼 수 있다.

참고문헌

건설교통부(2004) 수문관측매뉴얼.
김경섭 등(2004) 최소자승법에 의한 QUAL2E 모델 반응계수 보정, 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제37권 제9호, pp. 719-727.
남궁규철(1992) 우리나라 수질오염 측정망의 문제점 및 개선방안에 관한 연구 : 한강수계의 수질오염 측정망을 중심으로, 석사학위논문, 서울대학교.
손명기 등(1995) 금강하류부의 오염물질 발생현황과 유달울을 고

려한 유입부하량 산정, 대한환경공학회 추계학술연구발표대회, 대한환경공학회.

오경두(1997) 하천지동수측정망에 대하여, 한국수자원학회지, 한국수자원학회, 제30권 제4호, pp. 35-45.
최지용, 박원규, 이상일(1996) 하천 및 호소수 수질관리를 위한 자동측정망의 설계, 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제29권 제2호, pp. 167-178.
Brown, L.C. and Bamwell, T.O. (1987) *The enhanced stream water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS : Documentation and user manual*. Rep. EPA/600/3-87/007, U.S. Envie. Protection. Agency, Athens, Ga.
Burgess, S.J. and Lettenmaier, D.P. (1975) Probabilistic method in stream quality management, *Water Resour. Bull.* 11(1), pp. 115-130.
Carrera, J., Usunoff, E. and Szidarovszky, F. (1984) A method for optimal observation network design for groundwater management. *J. Hydrol.*, 73, pp. 147-163.
Forgo, F. (1974) *Nonconvex and Discreat Programming*. Kozg. es Jogi Konyvkiado, Budapest (in Hungarian).
Hughes, J.P. and Lettenmaier, D.P. (1981) Data requirement for kriging: Estimation and network design. *Water Resource. Res.*, 17(6), pp. 1641-1650.
Journel, A.G. and Huijbregts, Ch. J. (1978) *Mining Geostatistics*, Academic Press, New York, N.Y., pp. 600.
Lo, S.L., Kuo, J.T. and Wang, S.M. (1996) Water quality monitoring network design of keelung river northern taiwn, *Wat. Sci. Tech.* Vol. 34, No. 12, pp. 49-57.
Matheron, G. (1971) The theory of regionalized variable and its application. *Cah. Cent. Morphol. Math.*, Fasc. No. 5, Ecole Natl. Sup. Mines de paris (E.N.S.M.P.), Paris, pp. 211.
Melching, C.S. and Anmangandla, S. (1992) Improved first-order uncertainty method for water-quality modeling, *J. Envir. Engrg., ASCE*, 118(5), pp. 791-805.
Nakamura, M. and Riley, J.M. (1981) A multiobjective branch and bound method for network-structured water resource planning problem. *Water Resource. Res.*, 17(5), pp. 1349-1359.
Sharp, W.E. (1972) A topologically optimum water sampling plan for the Edisto river, North Carolina, Casebook on hydrological network design practice. *World Meteorological Organization*, WMO No. 324.

(접수일:2005.12.19/심사일:2006.1.31/심사완료일:2006.3.13)