

# 경안천 유역의 수질관측망 구성과 적정 측정 빈도

## Network Design and Measurement Frequency of Water Quality in Kyoung-An Stream Basin

경민수\*·김상단\*\*·김형수\*\*\*·김덕길\*\*\*\*

Kyoung, Minsoo·Kim, Sangdan·Kim, Hungsoo·Kim, Duckgil

### 요 지

본 연구에서는 시공간을 고려하여 경안천유역의 최적 수질 측정망을 구성하였다. 분석을 위해서 필요한 수질 데이터는 QUAL2E 모형을 이용하여 모의하였으며, 매개변수의 추정을 위하여 HEC-RAS모형과 민감도 분석 기법인 1차 신뢰성 분석(FORA)를 사용하였다. QUAL2E 모형의 모의 결과를 바탕으로 크리깅 기법과 Branch and Boundary Method를 이용하여 평수량 일때와 갈수량 일때로 구분하여 관측지점의 개수와 위치를 제시하였다. 선정된 지점을 기준으로 비례표본추출법(proportional sampling method)을 이용하여 각각의 지점별 측정 빈도를 제시하였다.

**핵심용어 : Qual2e, FORA, 크리깅, 비례표본추출법, 수질측정망구성**

## 1. 서 론

인류는 하천 주변을 중심으로 문명을 발전시켜 왔으며 현재도 하천과 함께 생활을 하고 있다. 하지만 산업화 도시화로 인해 인류에게 중요한 생활환경을 제공해주는 하천을 오염시키기에 이르렀고, 이로 인한 피해는 고스란히 인류에게 되돌아오게 되었다. 우리나라의 경우도 낙동강 페놀오염사고(1991)등 많은 하천오염사고가 발생하였으며 이로 인해 사회 전반적으로 하천수질에 대한 관심이 높아지기 시작하였다. 하천의 수질을 관리하는데 있어서 무엇보다도 중요한 것이 신뢰성 있는 수질 데이터를 확보하는 것이다. 하지만 수질 데이터를 확보하기 위해서는 많은 시간과 경비가 소요되기 때문에 유역을 대표할 수 있는 최적화된 수질측정지점과 측정 빈도를 제시하는 것이 무엇보다도 중요하다고 볼 수 있다.

따라서 본 논문에서는 유역의 분산 값을 이용해서 적절한 측정지점의 개수를 구하고 최적화 기법을 이용해서 측정지점을 선정하여, 유의수준과 신뢰구간이 고려된 월별 측정 빈도를 제시하고자 한다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 크리깅

크리깅(Kriging)방법은 분산을 이용하여 시간이나 지역적으로 분포되어있는 무작위한 특정값, 함수, 지역변

\* 정회원·인하대학교 환경토목공학부 박사과정-E-mail: gigatg@inha.ac.kr

\*\* 정회원·부경대학교 환경시스템공학부 전임강사공학박사 E-mail: skim@pknu.ac.kr

\*\*\* 정회원·인하대학교 환경토목공학부 부교수공학박사E-mail: sookim@mail.inha.ac.kr

\*\*\*\* 정회원·인하대학교 환경토목공학부 석사과정-E-mail: k1004dk@daum.net

수 등을 평가하는데 매우 유용하게 사용될 수 있다(Matheron, 1971). 또한 크리깅이론은 미계측지점의 분산을 구할수 있을 뿐만 아니라 분산이 최소화 되는 지점을 선정하는데도 사용될 수 있다. 이러한 크리깅 방법은 지하수의 운영에 있어서 최적화된 측정망을 구성하는데 적용된 사례가 많이 있다.(Hughes & Lettenmaier, 1981 ; Carrera et al., 1984 ).

n 개의 지점이 있고 그 지점의 위치를 각각  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$  이라하고 각각의 지점에서의 관측 값을  $Z(X_1), Z(X_2), Z(X_3), \dots, Z(X_n)$  이라고 하면 크리깅이론에 의해서 어떤 작은 구간  $V$ 에서의 균 관측 값은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\underline{Z} = (1/|V|) \int_V Z(X) dx \quad (1)$$

n개의 가용한 데이터에 가중치를 적용하면  $\underline{Z}$ 는 지점별로 가중치를 적용한 값인  $Z^*$ 로 표현할 수 있으며 그 식은 다음과 같다.

$$Z^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(X_i) \quad (2)$$

여기서  $\lambda_i$  는 크리깅계수이다. 크리깅방법은  $Z^*$ 에 의해서 구해진 정확한  $\underline{Z}$ 에 기반을 두고 있으며 다음의 두가지 조건을 만족해야 한다. (i) 추정된 값은 불편 추정량이어야 한다. 다시말해  $E(Z^*) = E(\underline{Z})$  이어야 하며 이는 제약식 (3)을 사용함으로써 해결 할 수 있다. (ii) 또한 추정값은 최소의 분산값을 가져야 한다(4).

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (3)$$

$$\text{Min } E[(Z^* - \underline{Z})^2] \quad (4)$$

## 2.2 Branch and Boundary Method

Branch and Boundary Method는 최적화를 위한 탐색기법 중에 하나이다. 그림 1에서 초가지점 A에서 시작하여 각각의 가치를 따라서 탐색이 진행되며 그 절차는 다음과 같다.

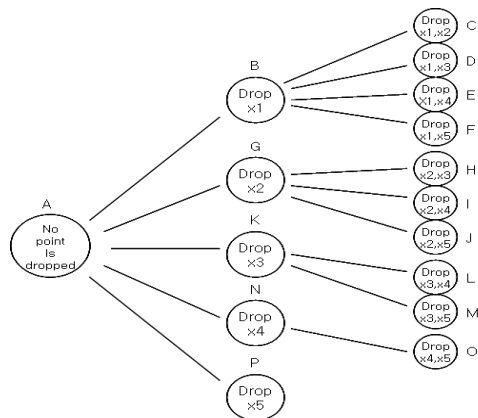


그림 1. Branch and Boundary Method

- ① 최초 지점인 A에서  $x_1$ 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. 이럴 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.

### 2.3 비례표본추출법

최적화된 수질 측정횟수를 산정하기 위해서 비례표본추출법을 사용하였다. 우선 각각의 수질측정 지점에서의 측정값이 정규분포를 따른다고 가정하면 식(5)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z = (X - \mu) / \sigma \quad (5)$$

여기서 Z는 정규화된 무작위 값이고, X는 무작위 값이다.  $\mu$  는 평균,  $\sigma$  는 표준편차이다. 유의수준  $\alpha$  % 를 가지는 정규분포이고 신뢰구간의 정도를 R이라정의 하면 R은 식(6)와 같이 나타낼수 있다.

$$R = (S_X Z_{\alpha/2}) / N^{1/2} \quad (6)$$

여기서  $S_X$  는 표준편차이고, N은 샘플의 개수이다.  $Z_{\alpha/2}$  는 정규분포의 분산계수이다. 전체 분산에 대한 각각의 지점이 가지는 분산의 비를 이용해서 표본추출 횟수를 구할 수 있다. 이렇게 하면 분산이 클수록 더 많이 측정해야 한다는 결론을 얻게 된다.

$$N_i = [S_{X_i}^2 / \sum S_{X_i}^2] T \quad (7)$$

여기서 T는 모든 지점에서의 측정횟수의 총합이며, T는 식(6)과 (7)에 의해서 구할 수 있다. 또한 식(7)에 의해서 각각의 지점별로 측정횟수를 구할 수 있다.

## 3. 적용 및 결과

대상유역은 경안천 유역으로 경기도 광주시와 용인시를 흐르고 있으며, 총 유역 면적은 561.13km<sup>2</sup> 이고 유로연장은 47.87km 이다. 경안천 유역은 수도권 상수원인 팔당호로 유입되는 큰 지류 중에 하나이기 때문에 정확한 수질 측정을 통한 오염량 규제가 절실한 곳이라 할 수 있다.

### 3.1 적용 방법

최적화된 수질측정지점과 지점별 측정빈도를 산정하는데 필요한 수질 데이터는 QUAL2E 모형을 이용하여 구하였다. 미계측 유역의 경우 인근유역의 유달율을 이용하여 유달부하량을 산정하였다. 또한 QUAL2E모형의 구축을 위해서 필요한 수리매개변수는 HEC-RAS모형을 이용하여 산정하였으며, 수질매개변수의 경우 FORA를 이용하여 민감도 분석을 실시한 이후에 시행착오법을 이용하여 산정하였다.

QUAL2E 모형에 의해서 모의된 수질자료를 바탕으로 하여 최적화를 통해서 최적지점을 선정하였다. 최적지점 선정에 위한 탐색방법으로는 Branch and Boundary Method을 이용하였으며, 그 과정에서 지점들이 제거되었을 경우에 분산이 최소화 되는 지점을 선정하기 위하여 크리깅이론을 사용하였다. 이렇게 선정된 지점을 바탕으로 비례표본 추출법을 사용하여 각 지점별 측정 빈도를 계산하였다.

### 3.2 적용 결과

적당한 측정지점의 개수를 선정하기 위하여 평수량일때와 갈수량일때로 나누어 각각의 경우에 따라서 지점을 제거해 가면서 분산이 일정해지는 지점의 개수를 산정하였으며, 평수량일때는 15개, 갈수량일때는 23개의 지점 수가 결정되었다. 각각의 지점 수에 해당하는 측정지점을 Branch and Boundary Method와 크리깅이론을 이용해서 구하였으며, 구한 지점을 중요도에 따라서 나열하면 표1과 같다.

표 1. 측정 지점

	평수량 (15개)	갈수량 (23개)
DO	32,12,31,20,2,25,7,15,28,4,17,9,22,30,26	32,12,31,20,2,25,7,15,28,4,17,9,22,30,26,14,6,18,23,10,1,29,11
BOD	32,11,22,31,2,17,7,26,14,4,20,28,9,24,30	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	32,21,8,31,13,1,26,18,5,11,24,29,16,3,7	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	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	32,12,31,20,2,25,7,15,28,4,17,9,22,30,26,14,6,18,23,10,1,29,11
NO3	32,8,28,15,23,2,19,31,11,5,25,21,17,13,30	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	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	32,21,8,31,13,1,26,18,5,11,24,29,16,3,7	32,25,5,18,11,31,1,14,21,28,8,3,16,23,30,12,26,9,20,6,29,15,17

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 2). 갈수량일 경우 선정된 관측지점을 그림 3에 표시하였다.

표 2. 관측 지점

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

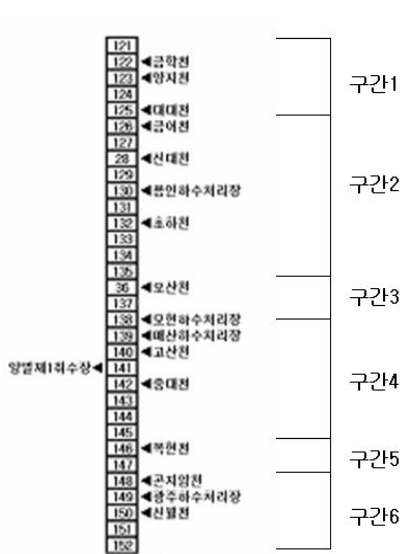


그림 2. QUAL2E 모식도

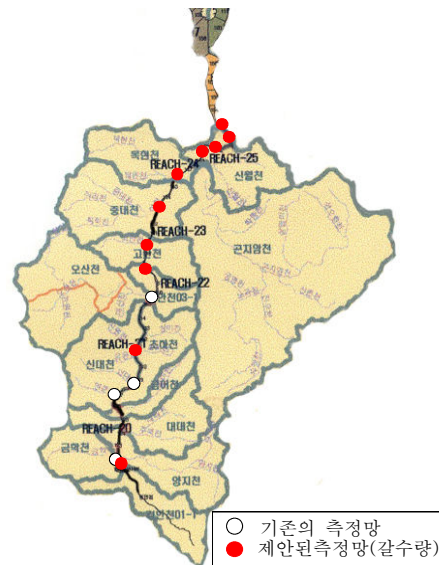


그림 3. 대상유역도(경안천)

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 적용하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

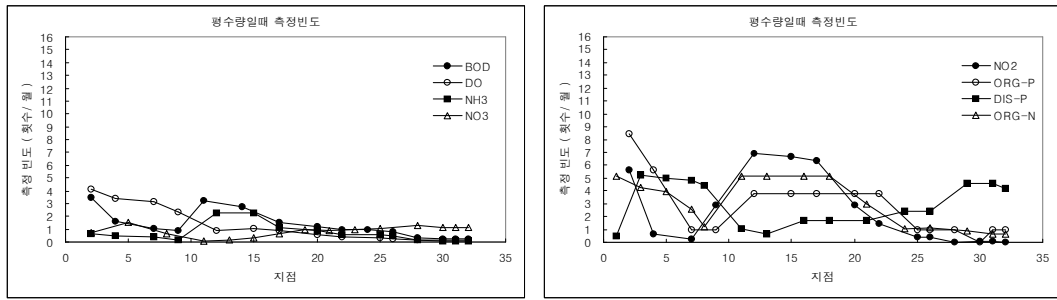


그림 4. 평수량일때 지점별 측정 빈도

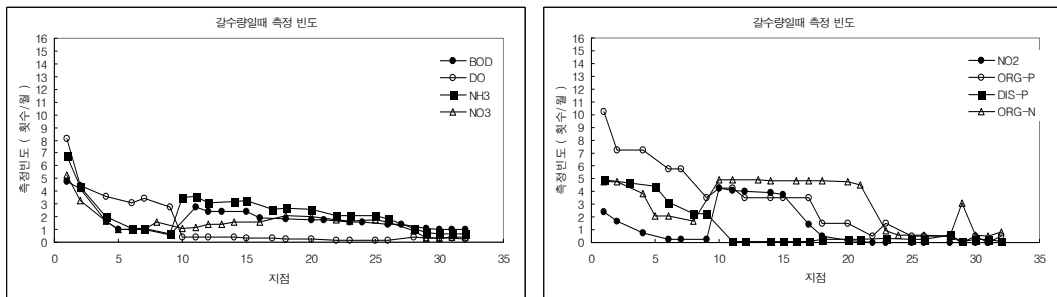


그림 5. 갈수량일때 지점별 측정 빈도

#### 4. 결론

본 연구에서는 경안천 유역을 대상으로 해서 수질을 모의하고 이를 이용해서 측정점의 개수와 측정지점 그리고 최적화된 측정빈도를 제시하였다. 측정지점을 산정하는 과정에서는 분산의 공간적 분포가 고려되었으며, 측정빈도를 구하는 과정에서는 각각의 지점에 따른 분산의 시간적 분포가 고려되었다. 즉, 각 지점의 월별 변화에 따른 분산의 변동성을 반영하였다. 이러한 본 연구의 결과와 하천의 접근성 등을 고려하여 측정지점을 선정한 연구 결과를 종합하여 측정지점을 제시하는 것이 가능할 것으로 생각된다.

#### 참 고 문 헌

1. Carrera, J., Usunoff, E and Szidarovszky, F. (1984), A method for optimal observation network design for groundwater management. *J. Hydrology*.73, pp.147-163
2. Hughes, J. P. and Lettenmaier, D. P. (1981), Data requirement for kriging: Estimation and network design. *Water Resource. Res.*, 17(6), pp. 1641-1650.
3. 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.
4. 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. 211.3
5. 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.