

# 역산이론을 이용한 수질모형의 매개변수 추정

## Parameter Estimation of the Water Quality model using the Inverse Theory

조범준\*, 조홍연\*\*, 정신택\*\*\*

Bum Jun Cho, Hong Yeon Cho, Shin Taek Jeong

### 요 지

수질모형의 지배방정식에서 정의되는 대표적인 수질매개변수는 유역 및 대기로부터의 오염부하량, 퇴적물로부터의 오염물질 용출부하량, 확산계수, 반응계수 등으로 직접적인 관측이 곤란할 뿐만 아니라 많은 관측 비용을 필요로 한다. 본 연구에서는 매개변수를 포함한 오염물질 수지방정식을 구성하고, 구성된 선형 연립 방정식을 이용함으로써 계산된 농도분포자료와 관측된 시계열 농도분포자료를 이용하여 계산한 질량변화량의 차이를 최소화하는 역산문제를 구성하여 모형의 매개변수를 추정하는 방법을 제시하였다. 이 방법을 이용하여 친수만, 울산만(울산항) 해역에서 관측된 연직방향 농도분포 자료를 이용하여 확산계수 및 대기로부터의 오염부하량, 퇴적물로부터의 오염물질 용출율, 확산-반응에 의한 오염물질 변화량 등을 추정하였으며, 추정 매개변수는 시기적으로 변동이 크게 나타났다. 반면, 추정매개변수를 이용한 관측자료와 계산결과를 비교한 결과, RMS 오차는 관측자료 범위의 5.0% 이하, 일치지수는 0.95 이상으로 본 방법을 이용한 매개변수 추정결과의 신뢰성은 우수한 것으로 파악되었다.

**핵심용어** : 역산문제, 모형 매개변수, 오염부하량, 용출부하량, 오염물질 수지방정식

### 1. 서 론

수질모형은 환경매개변수(environmental parameters)와 모형의 구조 매개변수를 이용하여 시간적·공간적으로 수질항목의 농도분포를 예측하는 모형이다. 오염물질의 농도분포를 정확하게 예측하고 신뢰성 있는 결과를 도출하기 위해서는 입력 매개변수(input parameters)가 정확하게 입력되어야 하며, 적절한 모형의 보정 및 검증과정(calibration & verification processes)을 필요로 한다. 환경매개변수는 기상인자(기온, 습도, 풍향·풍속, 강우량, 증발량, 일사량 등), 유역 오염부하량(유역에서 해역으로 유입되는 수량 및 오염물질의 농도[수질]) 등으로 직접적인 관측이 가능한 항목이다. 연안 유역의 경우에는 유역 오염부하량에 관한 정보도 매우 미흡한 실정이나, 유역 오염부하량 정보에 비하면 상대적으로 모형 구조 매개변수에 대한 정보는 거의 전무한 실정이다. 반면, 모형의 구조 매개변수는 모형의 구조에서 정의되는 변수 또는 해역에서의 매개변수이기 때문에 직접적인 관측이 곤란한 항목이다. 모형의 지배방정식에서 정의되는 대표적인 매개변수는 대기로부터의 오염부하량, 퇴적물로부터의 오염물질 용출부하량, 확산계수, 반응계수 등이다. 퇴적물로부터의 용출부하량은 오염된 퇴적물을 이용하여 실험실에서의 오염물질 농도변화를 관측하여 추정

\* 정회원 · 원광대학교 토목환경도시공학부 박사과정 · E-mail : [satobage@wonkwang.ac.kr](mailto:satobage@wonkwang.ac.kr)

\*\* 정회원 · 한국해양연구원 연안·항만연구본부 책임연구원 · E-mail : [hycho@kordi.re.kr](mailto:hycho@kordi.re.kr)

\*\*\* 정회원 · 원광대학교 토목환경도시공학부 교수 · E-mail : [stjeong@wonkwang.ac.kr](mailto:stjeong@wonkwang.ac.kr)

하는 방법이 이용되고 있으나, 현장여건을 반영하지 못하고 과다한 비용이 소요되는 단점이 있다 (한국해양연구원, 1998). 또한, 대기로부터의 오염부하량은 연안해역에서 관측된 경우가 매우 미흡한 실정이고, 반응계수 및 확산계수(연직 및 평면확산계수)는 문헌에서 제시되는 수치를 이용하거나, 모형의 보정 및 검증과정에서 조정하는 경우가 대부분이다. 따라서, 수질모형을 이용하여 해역 환경변화를 예측하는 연구를 수행하기 위해서는 신뢰성 있는 모형의 매개변수 추정과정이 선행되어야 한다(조, 2004). 본 연구에서는 추정하고자 하는 수질모형의 매개변수를 포함한 오염물질 수지방정식을 구성하고, 구성된 방정식을 이용하여 계산되는 농도분포자료와 시계열 농도분포자료의 오차를 최소화하는 역산문제(Inverse problem)를 구성하여 수질모형의 매개변수를 추정하는 방법을 제시하였다. 또한, 제시된 모형을 이용하여 천수만, 울산만(울산항) 해역에서 관측된 연직방향 농도분포 자료를 이용하여 확산계수 및 대기로부터의 오염부하량, 퇴적물로부터의 오염물질 용출율, 확산·반응에 의한 오염물질 변환량(transformation rate) 등을 추정하여 본 연구에서 제시한 방법의 적합성·적용성을 검토하였으며, 제시된 방법의 신뢰도를 분석하기 위하여 추정 매개변수를 이용하여 계산한 농도분포자료와 관측된 농도분포자료와의 오차를 분석하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 역산문제(Inverse problem)

일반적인 문제는 모든 입력 자료가 제공된 상태에서 결과(출력)를 제시하는 과정을 따른다. 반면, 역산문제는 관측(제공)된 출력자료를 이용하여 모형 입력 자료를 역산으로 추정하는 방법으로써 실질적으로 모형 입력자료 관측이 곤란한 경우 또는 출력자료의 체계적인 관측이 가능한 경우에 다양하게 이용되고 있다. 역산문제는 미지수 개수와 방정식 개수에 따라 세 가지 형태가 있다(Hensel, 1991). 그 중에서 중복 연립문제(Over-determined)는 미지수 개수보다 방정식 개수가 많은 경우로 다중해(multiple solution)가 얻어지는 조건이다. 따라서, 목적함수를 선정하여 최적해(optimal solution)를 구하는 과정이 포함되며, 가장 일반적인 역산문제에 해당한다. 조(2001)는 역산문제를 이용하여 관망(pipe network) 누수탐지 문제해석에 적용한 바 있다.

### 2.2 오염물질 수지방정식의 구성, 적용해역 및 신뢰도 분석

연직방향으로 수층을 구분하고, 구분된 수층(layer)에서 오염물질의 유입량, 유출량을 고려하는 오염물질 수지방정식을 구성할 수 있다(Fig. 1).

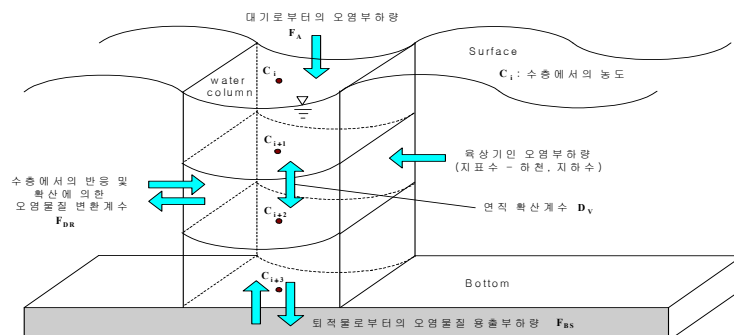


Fig. 1. Schematic Diagram of the Pollutants Budget Model

평면방향에 대해서도 흐름방향 또는 흐름에 직각인 방향 등으로 해역을 구분하여 물질 수지방정식을 구성할 수 있으며, 평면으로 구분된 수층을 연직방향으로 재분할하여 물질 수지방정식을 구성할 수도 있다(한국해양연구원, 1996). 본 연구에서의 연직방향 오염물질 수지방정식은 시간영역 ( $t_1, t_2; t_2-t_1=\Delta t$ )에 대하여 분할된 각각의 단면(층, layer)에 대하여 다음과 같이 구성할 수 있다. 식 (1), (2), (3)으로 표현되는 물질수지방정식은 4개의 매개변수(미지수)를 포함하고 있으며, 구성되는 방정식은 연직방향으로 분할한 수층의 개수만큼 형성된다. 따라서, 추정하고자하는 매개변수 개수보다 연직방향으로 수층을 보다 많이 분할하면 최적해를 구할 수 있다.

○ 표층(위치기호  $i = 1$ )

$$F_A \cdot \Delta t \cdot A_S + F_{DR} \overline{C}_0 \cdot \Delta t \cdot A_H + (D_V)(\overline{C}_0 - \overline{C}_1)/h \cdot A_S \cdot \Delta t = \Delta M_0 \quad (1)$$

○ 물질수지방정식(수층  $i = 2, \dots, NL-1$ )

$$F_{DR} \overline{C}_i \cdot \Delta t \cdot A_H + (D_V)(\overline{C}_{i-1} - 2\overline{C}_i + \overline{C}_{i+1})/h \cdot A_S \cdot \Delta t = \Delta M_i \quad (2)$$

○ 저층(위치기호  $i = NL$ )

$$F_{BS} \cdot \Delta t \cdot A_S + F_{DR} \overline{C}_{NL} \cdot \Delta t \cdot A_H + (D_V)(\overline{C}_{NL-1} - \overline{C}_{NL})/h \cdot A_S \cdot \Delta t = \Delta M_{NL} \quad (3)$$

여기서,  $F_A, F_{BS}, F_{DR}, D_V$  변수는 모형의 구조매개변수이며, 각각 대기로부터의 오염부하량 ( $\text{mg}/\text{m}^2\text{-day}$ ), 퇴적물로부터의 오염물질 용출부하량( $\text{mg}/\text{m}^2\text{-day}$ ), 수층에서의 반응 및 확산에 의한 수질항목(오염물질)의 변환계수( $1/\text{day}$ ), 연직 확산계수( $\text{m}^2/\text{day}$ )이다.  $\overline{C}_i = (C_i^{t_1} + C_i^{t_2})/2$ ,  $\Delta M = (C_i^{t_1} h_i^{t_1} - C_i^{t_2} h_i^{t_2}) A_s = i$ 번째 수층에서 오염물질의 시간 ( $t_1, t_2$ ) 기간의 산술평균농도 및 연속된 농도분포자료를 이용하여 추정한 오염물질의 질량변화량,  $A_S, A_H =$  각각 수층의 표면적, 수층의 측면 면적( $\text{m}^2$ )이며,  $h =$  수층의 두께( $\text{m}$ ),  $\Delta t =$  연속된 시계열 농도분포자료의 시간간격( $\text{s}$  또는  $\text{day}$ )이다.

본 연구에서 제안한 방법을 적용하기 위하여 현장관측을 통하여 천수만, 울산항(울산만) 해역의 시계열 농도분포(연직방향 농도분포)를 확보하였다. 수질항목의 관측은 연직방향 5개 층에 대하여 수행하였고, 수질성분은 천수만은 DO, COD, SS, TN, TP 이며, 울산항은 DO, COD, TN 이다. 천수만은 2개 정점에서 5개의 시계열 농도분포 자료를 확보하였으며, 울산항(울산항)에서도 4개의 시계열 농도분포 자료를 확보하였다. 식 (1), (2), (3)을 이용하여 조석변화가 우세한 천수만 2개 정점 및 조석변화가 서해안에 비하여 미미한 동해안의 울산항 1개 정점에 대하여 행렬식을 구성하였다. 천수만, 울산항 해역 모두 동일한 구조의 모형을 적용하였으며, 관측시기(시간에 따른 조위변화)에 따른 변화를 저감하기 위하여 평균해수면 기준으로 농도분포자료를 선형보간(linear interpolation)한 자료로 변환하였다. 천수만 영역은 조위의 영향이 크고, 관측시기가 고조-저조-고조 시기를 반복하여 관측된 농도 분포자료이기 때문에 고조-저조 자료를 평균하여 4개의 시계열 농도분포자료로 환산하여 모형 매개변수를 추정하였다. 또한, 울산항 지점도 변화정도를 완화하기 위하여 연속된 기간의 자료를 평균하여 매개변수를 추정하였다.

## 2.2.2 추정 매개변수의 변동양상 및 신뢰도 분석

본 연구에서 제시한 방법으로 추정한 결과, 모형 매개변수는 전반적으로 관측시간 및 지점에

따라 큰 변화를 보이고 있는 것으로 파악되었다. 천수만 1 지점의 대기로부터의 추정 오염부하량 ( $\text{mg}/\text{m}^2/\text{day}$ )은 COD, SS, TN, TP 항목에 대하여 각각 -1.719, -13.870, 0.518, -0.009이다. 분량상의 관계로 천수만 1지점의 결과자료만 수록하였다(표 1. 참조).

표 1. 천수만 1지점의 추정 매개변수

농도	매개변수	시 간 단 계			평균
		$\Delta T1$	$\Delta T2$	$\Delta T3$	
COD	$F_A$	4.095	-22.300	13.048	-1.719
	$F_{DR}$	0.970	2.022	-1.938	0.351
	$D_V$	-8.313	4.981	-7.338	-3.557
	$F_{BS}$	-1.748	-5.110	12.397	1.846
SS	$F_A$	-12.997	-52.773	24.161	-13.870
	$F_{DR}$	1.181	0.310	-1.275	0.072
	$D_V$	7.813	4.249	3.132	5.064
	$F_{BS}$	-22.720	13.683	50.002	13.655
TN	$F_A$	0.378	1.290	-0.114	0.518
	$F_{DR}$	0.159	-0.301	-0.429	-0.190
	$D_V$	-16.585	39.940	6.145	9.833
	$F_{BS}$	-1.859	4.140	-1.000	0.427
TP	$F_A$	0.071	-0.121	0.023	-0.009
	$F_{DR}$	0.223	0.511	-0.366	0.123
	$D_V$	-0.457	-11.420	5.511	-2.122
	$F_{BS}$	-0.117	-0.698	0.316	-0.166

또한, 추정매개변수를 이용함으로써 계산된 오염물질 총량과 관측자료를 이용한 총량을 비교하여 추정 매개변수를 이용한 방법의 적합성 및 신뢰도를 분석하였다. RMS 오차를 수질항목별 계산된 질량변화량에 대하여 산정하였으며, 계산된 결과는 COD, SS, TN, TP, DO(용산량) 항목에 대하여 각각 0.9211, 2.8845, 0.0296, 0.0243, 0.0810 정도이며, 질량변화량의 범위에 비하여 약 5.0% 정도 또는 그 이하로 매개변수를 이용한 추정치가 관측치에 근사함을 알 수 있다.

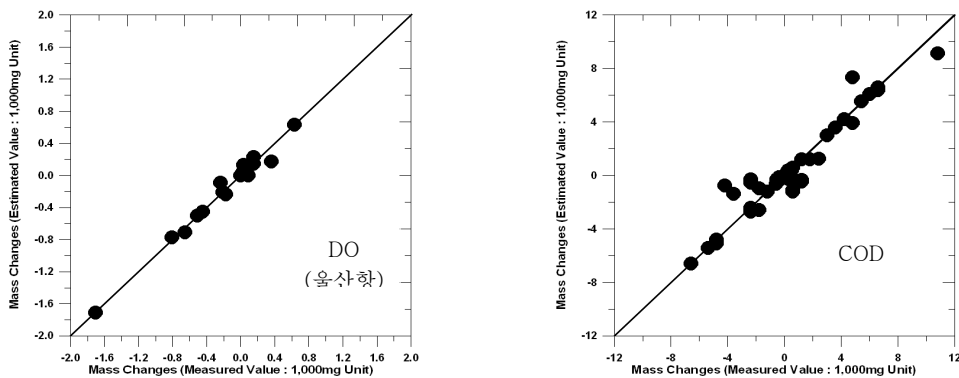


Fig. 2. Comparison of the Measured and Estimated Mass Changes.

한편, Willimott(1981)가 제안한 일치지수(index of agreement)  $I_a$ 를 각각의 수질항목에 대하여 계산하였다. 일치지수는 식 (6)과 같이 표현되며, 1.0에 가까워질수록 추정치가 관측치에 일치함을 의미한다. COD, SS, TN, TP, DO 항목에 대하여 계산된 일치지수  $I_a$ 는 각각 0.979, 0.987,

0.971, 0.969, 0.993으로 계산결과와 관측결과가 매우 근접한 일치경향을 보이는 것으로 파악되었다(Fig. 2. 참조).

$$I_a = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N [ |P_i - \bar{O}_i| + |O_i - \bar{O}_i| ]^2} \quad (6)$$

여기서,  $P_i$ ,  $O_i$  기호는 각각 매개변수를 이용한 예측된 질량변화량, 관측된 질량변화량을 나타내며,  $\bar{O}_i$ 는 관측된 질량변화량의 평균을 의미한다.

### 3. 결론

제안된 방법을 이용하여 천수만, 울산항 해역에서 수질모형의 매개변수에 해당하는 대기로부터의 오염부하량, 퇴적물로부터의 오염물질 용출부하량, 확산계수, 반응 및 확산에 의한 오염물질의 변환계수를 추정하였다. 추정결과는 전반적으로 관측시기 및 지점에 따라 큰 변화를 보이고 있는 것으로 파악되었으나, 역산문제를 이용한 매개변수 추정방법은 안정적으로 최적해를 제공하는 것으로 파악되었다. 본 연구에서 제시한 방법은 역산문제(inverse problem)를 이용하는 방법으로, 적절한 시계열 농도분포자료를 체계적으로 관측을 통하여 확보하면 다양한 모형의 구조에 대하여 매개변수를 추정할 수 있으며, 이론적으로는 장기·단기 수질변동 예측에 필요한 매개변수를 추정할 수 있는 장점이 있다. 또한, 본 방법은 매우 복잡한 모형에 대해서도 물질수지 방정식을 구성하여 수월하게 모형 매개변수를 추정할 수 있다. 그러나, 본 방법을 이용하여 추정한 결과의 신뢰성을 확보하기 위해서는 가능한 직접 관측결과와의 비교를 통한 연구가 보다 다양하고 심도 있게 수행되어야 할 것으로 사료된다. 본 연구에서 제시한 방법은 기본적으로 체계적인 관측 및 정확한 자료의 축적이 선행되어야 하며, 관측자료의 품질관리 및 체계적인 설계에 중점을 두어 수행하여야 한다(Hensel, 1991). 또한, 매개변수에 제약조건을 부여하여 추정하는 방법 및 추정된 결과와 직접적인 관측에 의하여 추정된 결과 및 타 지역에서 추정된 결과와의 비교과정을 통하여 역산문제를 이용한 방법의 적용 가능성을 다각적으로 분석하는 연구가 수행되어야 한다.

### 감 사 의 글

본 연구는 한국해양연구원 기본연구사업 “연안 통합관리를 위한 해양환경변화 특성 규명 - 천수만 유역” 사업의 일환으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

Hensel, E. (1991). Inverse Theory and Application for Engineers, Prentice-Hall Inc.  
 Willmott, C.J. (1981). On the validation of models. Physical Geography, Vol.2 (No.2), pp.184-194.  
 조범준 (2001). 역산문제를 이용한 관망에서의 누수탐지, 서울대학교 대학원 공학석사 학위논문.  
 조홍연 (2004). 연안 오염부하량 관측 및 추정기술, 해양정책·R&D동향, R&D Preview, 해양수산부, 한국해양연구원, 제20호. pp.21-25.  
 한국해양연구소 (1996). 연안역 이용 및 통합관리를 위한 연구(Ⅱ·Ⅲ), 제2·3차년도보고서, 해수유동 및 수질모델링분야 (채장원 등), BSPN 00322-968-7, 과학기술처.