

역산이론을 이용한 연안 수질모형의 매개변수 추정 Parameter Estimation of Coastal Water Quality Model Using the Inverse Theory

조홍연* · 조범준** · 정신태**

Hong Yeon Cho*, Bum Jun Cho** and Shin Taek Jeong**

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

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

Abstract : Typical water quality (WQ) parameters defined in the governing equation of the WQ model are the pollutant loads from atmosphere and watersheds, pollutant release rates from sediment, diffusion coefficient and reaction coefficient etc. The direct measurement of these parameters is very difficult as well as requires high cost. In this study, the pollutant budget equation including these parameters was used to construct the linear simultaneous equations. Based on these equations, the inverse problems were constructed and WQ parameter estimation method minimizing the sum of squared errors between the computed and observed amounts of the mass changes was suggested. WQ parameters, i.e., the atmospheric pollutant loads, sediment release rates, diffusion coefficients and reaction coefficient, were estimated using this method by utilizing the vertical concentration profile data which has been observed in Cheonsu Bay and Ulsan Port. Values of the estimated parameters show a large temporal variation. However, this technique is persuasive in that the RMS (root mean square) error was less than 5.0 % of the observed value ranges and the agreement index was greater than 0.95.

Keywords : inverse problem, model parameters, pollutant loads, pollutant release rates, pollutant budget equation

1. 서 론

수질모형은 환경매개변수와 모형의 구조 매개변수를 이용하여 시간적·공간적으로 수질항목의 농도분포를 예측하는 모형이다. 오염물질의 농도분포를 정확하게 예측하

고 신뢰성 있는 결과를 도출하기 위해서는 입력 매개변수가 정확하게 입력되어야 하며, 적절한 모형의 보정 및 검증과정(calibration & verification processes)을 필요로 한다. 특히, 수치모형의 기본이론에 해당하는 GIGO 개념 (Garbage In, Garbage Out; 쓰레기를 입력하면 쓰레기가

*한국해양연구원 연안·항만공학연구본부(Corresponding author, Coastal and Harbour Engineering Research Lab., Korea Ocean R&D Institute, Ansan PO Box 29, Seoul 425-600, korea. hych@kordi.re.kr)

**원광대학교 토목환경도시공학부(School of Civil, Environmental & Urban Engineering, Wonkwang Univ.)

나온다는 내용으로, 입력자료가 나뉘면 아무리 모형이 우수하다 할지라도 영터리 결과가 나온다는 개념에 의하면 정확한 입력매개변수의 산정은 수질모형의 적용과정에서 매우 중요한 사안이다.

환경매개변수는 기상인자(기온, 습도, 풍향·풍속, 강수량, 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(한국해양연구소, 1995, 1996). 반면, 모형의 구조 매개변수는 모형의 구조에서 정의되는 변수 또는 해역에서의 매개변수이기 때문에 직접적인 관측이 곤란한 항목이다. 직접적인 관측이 곤란하지만, 연안 수질모형의 지배방정식에서 정의되는 대표적인 매개변수는 대기로부터의 오염부하량, 퇴적물로부터의 오염물질 용출부하량, 확산계수, 반응계수 등이다. 퇴적물로부터의 용출부하량은 오염된 퇴적물을 이용하여 실험실에서의 오염물질 농도변화를 관측하여 추정하는 방법이 이용되고 있으나, 현장여건을 반영하지 못하고 과다한 비용이 소요되는 단점이 있다(한국해양연구소, 1997). 또한, 대기로부터의 오염부하량은 연안해역에서 관측한 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 해역환경변화를 예측하는 연구를 수행하기 위해서는 신뢰성있는 모형의 매개변수 추정과정이 선행되어야 한다(조, 2004).

본 연구에서는 추정하고자 하는 수질모형의 매개변수를 포함한 오염물질 수지방정식을 구성하고, 구성된 방정식을 이용하여 계산되는 농도분포자료와 시계열 농도분포

자료의 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·적용성 검토하였으며, 제시된 방법의 신뢰도를 분석하기 위하여 추정 매개변수를 이용하여 계산한 농도분포자료와 관측된 농도분포자료와의 오차를 분석하였다.

2. 역산문제(inverse problem)

역산문제는 일반적으로 문제를 해결하는 과정을 따르는 방법이 아니라 반대의 과정을 따르는 방법이다(Table 1 참조). 일반적인 문제는 모든 입력 자료가 제공된 상태에서 결과(출력)를 제시하는 과정을 따르지만, 역산문제는 관측(제공)된 출력자료를 이용하여 모형 입력 자료를 역산으로 추정하는 방법이다. 이 방법은 실질적으로 모형 입력자료 관측이 곤란한 경우 또는 출력자료의 체계적인 관측이 가능한 경우에 다양하게 이용되고 있다. 연안·항만 공학 분야에서 이용되는 Hindcasting, Nowcasting, Forecasting 문제는 공학적인 문제분류에 의하면, 모의(simulation, 다양한 예상 가능한 경우[제공되는 입력조건]에 대한 예측) 문제에 해당한다.

한편, 역산문제는 미지수(추정 매개변수)의 개수와 방정식의 개수에 따라 완전연립(even-determined) 문제, 불완전연립(under-determined) 문제, 중복연립(over-determined) 문제의 형태로 구별할 수 있다(Hensel, 1991). 완전연립 문제는 미지수 개수와 방정식 개수가 같은 경우이고, 유일해(unique solution)가 얻어지는 조건이다. 불완전연립문

Table 1. Classification of the Engineering problems(Lee, 2000)

Problem Type	Input Information (Model parameters)	System (Model)	Output Information	Remarks
Prediction	Known	Known	Unknown (Computed)	General problem type (simulation) Forward problem operation vs. design
Identification	Known	Unknown	Known	Model building (development) structure vs. parameter
Detection (Estimation)	Unknown	Known	Known	Inverse (Backward) problem controllable vs. uncontrollable

제는 미지수 개수보다 방정식 개수가 적은 경우로 유일해를 결정할 수 없는 경우이다. 이 경우에는 특이값(singular value) 분해 등의 방법으로 해를 구할 수 있으나, 유용한 방법은 아니므로 특별한 경우를 제외하고는 역산문제의 적용에서 배제되고 있는 실정이다. 반면, 중복연립문제는 미지수 개수보다 방정식 개수가 많은 경우로 다중해(multiple solution)가 얻어지는 조건이다. 따라서, 목적함수를 선정하여 최적해(optimal solution)를 구하는 과정이 포함되며, 가장 전형적이고 안정적인 해를 제공하는 역산문제에 해당한다. 역산이론은 물리탐사 분야에서 활발하게 적용되고 있으며, 해양 및 연안환경 분야에도 적용범위를 확장하고 있다(Bennett & McIntosh, 1982; Legovic et al., 1990; Scales et al., 2001). 또한, 해양에서의 열수지 분석을 위한 기상인자 추정, 산사태 모형 등에도 적용되고 있다(Gaspar, et al., 1990; Lee, 1994; Ancey et al., 2003). 조(2001)는 역산문제를 이용하여 관망(pipe network) 누수탐지 문제해석에 적용한 바 있다. 그러나, 역산이론을 수질모형의 매개변수 추정에 적용한 사례는 매우 미흡한 실정이므로, 본 연구에서는 역산문제의 구성, 매개변수의 추정과정에 대한 적용에 중점을 두어 수행하였다. 물질수지 방정식을 이용한 중복연립형태의 문제를 구성하였으며, 미지수 개수는 추정하고자 하는 모형 매개변수의 개수이며, 방정식의 개수는 구성되는 오염물질 수지방정식의 개수에 해당한다.

3. 모형 매개변수 추정 기법

3.1 모형의 구조 및 특성

모형의 구조는 모의하고자 하는 수질항목의 특성에 따라 다르게 표현될 수 있으나, 수질항목의 반응식을 간략하게 고려하면 오염물질 수지방정식(pollutant budget equation)으로 구성할 수 있다. 본 논문에서 제시하는 모형의 구조는 부분적으로 보다 복잡한 단계로 수정할 수 있으나, 수정에 따른 추정기법의 근본적인 차이는 없다. 오염물질 수지방정식은 적용하는 공간분포에 따라 평면방향, 연직방향으로 구분할 수 있으나 본 연구에서는 연직방향에 대하여 모형을 구성하였다. 즉, 연직방향으로 수층을 구분하고, 구분된 수층(layer)에서 오염물질의 유입량, 유출량을 고려하는 오염물질 수지방정식을 구성할 수 있다(Fig. 1). 평면방향에 대해서도 흐름방향 또는 흐름에 직각인 방향 등으로 해석을 구분하여 물질 수지방정식을 구성할 수 있으며, 평면으로 구분된 수층을 연직방향으로

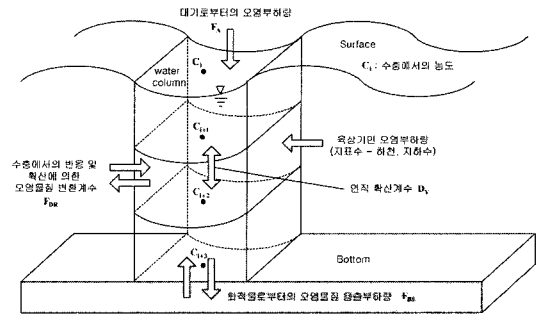


Fig. 1. Schematic Diagram of the Pollutant Budget Model.

재분할하여 물질 수지방정식을 구성할 수도 있다(한국해양연구소, 1999a, 1999b; Jorgensen and Gromiec, 1989).

본 연구에서의 연직방향 오염물질 수지방정식은 시간 영역 (\$t_1, t_2; t_2-t_1=\Delta t\$)에 대하여 분할된 각각의 단면(층, layer)에 대하여 다음과 같이 구성할 수 있다.

○ 표층(위치기호 \$i=0\$)

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

○ 저층(위치기호 \$i=NL\$)

$$(F_{BS} \cdot \Delta t \cdot A_S + F_{DR} \cdot \bar{C}_{NL} \cdot \Delta t \cdot A_H + (D_V) \cdot (\bar{C}_{NL-1} - \bar{C}_{NL}) / h \cdot A_S \cdot \Delta t = \Delta M_{NL} \quad (2)$$

○ 물질수지방정식(수층 \$i = 1, 2, \dots, NL-1\$)

$$(F_{DR} \cdot \bar{C}_i \cdot \Delta t \cdot A_H + (D_V) \cdot (\bar{C}_{i-1} - 2\bar{C}_i + \bar{C}_{i+1}) / h \cdot A_S \cdot \Delta t = \Delta M_i \quad (3)$$

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

식 (1), (2), (3)을 행렬형태로 표현하면 식 (4)와 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} A_s \Delta t & \overline{C_0} A_H \Delta t & A_s \Delta t (\overline{C_0} - \overline{C_1}) / h & 0 \\ 0 & \overline{C_1} A_H \Delta t & A_s \Delta t (\overline{C_0} - 2\overline{C_1} + \overline{C_2}) / h & 0 \\ 0 & \overline{C_2} A_H \Delta t & A_s \Delta t (\overline{C_1} - 2\overline{C_2} + \overline{C_3}) / h & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \overline{C_{NL-1}} A_H \Delta t & A_s \Delta t (\overline{C_{NL-2}} - 2\overline{C_{NL-1}} + \overline{C_{NL}}) / h & 0 \\ 0 & \overline{C_{NL}} A_H \Delta t & A_s \Delta t (\overline{C_{NL-1}} - \overline{C_{NL}}) / h & A_s \Delta t \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} F_A \\ F_{DR} \\ D_V \\ F_{BS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta M_0 \\ \Delta M_1 \\ \Delta M_2 \\ \dots \\ \dots \\ \Delta M_{NL-1} \\ \Delta M_{NL} \end{bmatrix} \quad (4)$$

3.2 매개변수 추정방법

식 (1), (2), (3)으로 표현되는 물질수지방정식은 4개의 매개변수(미지수)를 포함하고 있으며, 구성되는 방정식은 연직방향으로 분할한 수층의 개수만큼 형성된다(식 (4) 참조). 따라서, 추정하고자하는 매개변수 개수보다 연직방향으로 수층을 보다 많이 분할하면 최적해를 구할 수 있다. 또한, 매개변수의 계수를 계산할 수 있는 시계열 관측자료를 확보한다면 최적 매개변수 추정은 이론적으로는 구성된 행렬의 해를 구하는 방법으로 귀결된다(식 (5), (6), (7), (8) 참조).

$A =$

$$\begin{bmatrix} A_s \Delta t & \overline{C_0} A_H \Delta t & A_s \Delta t (\overline{C_0} - \overline{C_1}) / h & 0 \\ 0 & \overline{C_1} A_H \Delta t & A_s \Delta t (\overline{C_0} - 2\overline{C_1} + \overline{C_2}) / h & 0 \\ 0 & \overline{C_2} A_H \Delta t & A_s \Delta t (\overline{C_1} - 2\overline{C_2} + \overline{C_3}) / h & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \overline{C_{NL-1}} A_H \Delta t & A_s \Delta t (\overline{C_{NL-2}} - 2\overline{C_{NL-1}} + \overline{C_{NL}}) / h & 0 \\ 0 & \overline{C_{NL}} A_H \Delta t & A_s \Delta t (\overline{C_{NL-1}} - \overline{C_{NL}}) / h & A_s \Delta t \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$x = \begin{bmatrix} F_A \\ F_{DR} \\ D_V \\ F_{BS} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$B = \begin{bmatrix} \Delta M_0 \\ \Delta M_1 \\ \Delta M_2 \\ \dots \\ \dots \\ \Delta M_{NL-1} \\ \Delta M_{NL} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$A \cdot x = B \quad (8)$$

여기서, $A =$ 상수행렬($NL \times 4$ Matrix), $x =$ 매개변수(미지수)를 포함한 행렬(4×1 Matrix), $B =$ 오염물질 질량변화 행렬($NL \times 1$ Matrix)이며, $NL =$ 분할된 수층의 개수로 추정하고자 하는 매개변수의 개수보다 큰 값이다(본 연구의 경우, $NL \geq 4$). 따라서, 식 (8)과 같은 행렬식을 구성하면 최소자승해(least square solutions)에 해당하는 매개변수 행렬은 식 (9)를 이용하여 계산할 수 있다(Strang, 1980).

$$x = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot B \quad (9)$$

4. 매개변수 추정기법의 적용

4.1 시계열 수질항목 농도분포 자료

본 연구에서 제안한 방법을 적용하기 위하여 천수만, 울산항(울산만) 해역의 시계열 농도분포(연직방향 농도분포)를 현장관측을 통하여 확보하였다(관측지점은 Fig. 2참조). 수질항목의 관측은 연직방향 5개 층에 대하여 수행하였으며, 수질오염 공정시험법에 제시된 방법으로 분석하였다. 관

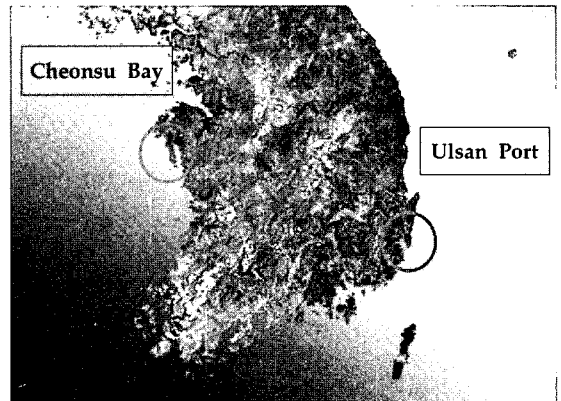


Fig. 2. Monitoring Stations of the Cheonsu Bay and Ulsan Port.

측 수질항목은 천수만은 DO(용존산소, dissolved oxygen), COD(화학적산소요구량, chemical oxygen demand), SS(부유물질, suspended solids), TN(총질소, total nitrogen), TP(총인, total phosphorus) 항목이며, 울산항은 DO, COD, TN 항목이다. 천수만은 2개 정점에서 5개의 시계열 농도분포 자료를 확보하였으며, 울산만(울산항)에서도 4개의 시계열 농도분포 자료를 확보하였다.

관측자료 및 관측정보는 Table 2에 정리하여 제시하였다. 천수만 지점의 평균수심(평균해수면 MSL [mean

Table 2. Measurement stations and water quality concentrations
(a) Data in Cheonsu Bay (Pt. 1, North Jukdo: 126° 26'E, 36° 33'N; 2004. 7.27 - 7.28)

Time & Date						
Data Set - T1 10:27(7/27)	pH	COD	SS	TN	TP	
D1	7.37	4.60	6.00	0.796	0.048	
D2	7.27	4.00	11.20	0.736	0.057	
D3	7.72	2.20	7.60	0.848	0.063	
D4	7.28	2.80	7.20	0.854	0.087	
D5	7.28	5.60	16.00	1.005	0.121	
Data Set - T2 17:12(7/27)						
D1	7.51	2.40	6.80	0.742	0.048	
D2	7.30	4.80	7.20	0.753	0.057	
D3	7.25	3.40	6.80	0.797	0.042	
D4	7.55	2.60	4.80	0.854	0.055	
D5	7.45	4.20	9.20	1.196	0.104	
Data Set - T3 23:38(7/27)						
D1	7.64	2.00	5.20	0.661	0.030	
D2	7.68	1.20	6.00	0.727	0.050	
D3	7.47	1.80	4.00	0.784	0.057	
D4	7.54	1.00	7.20	0.938	0.080	
D5	7.23	2.80	15.20	1.019	0.127	
Data Set - T4 06:23(7/28)						
D1	7.96	3.60	15.20	0.716	0.053	
D2	7.46	2.00	6.40	0.728	0.036	
D3	7.52	1.60	4.80	0.921	0.048	
D4	7.60	0.60	2.80	0.909	0.060	
D5	7.60	1.60	6.40	0.956	0.153	
Data Set - T5 11:50(7/28)						
D1	7.98	3.20	7.60	0.868	0.034	
D2	7.58	4.20	10.80	0.987	0.048	
D3	7.76	3.40	6.40	0.994	0.081	
D4	7.42	2.80	10.80	1.047	0.092	
D5	7.62	2.40	14.40	1.504	0.119	

(b) Data in Cheonsu Bay (Pt. 2: 126° 26'E, 36° 33'N; 2004. 7.27 - 7.28)

Time & Date						
Data Set - T1 10:27(7/27)	pH	COD	SS	TN	TP	
D1	7.50	3.60	10.00	0.860	0.091	
D2	6.80	3.20	10.40	0.804	0.055	
D3	7.16	3.60	12.00	0.822	0.087	
D4	7.60	2.40	12.40	0.839	0.081	
D5	7.23	2.80	10.40	0.876	0.098	
Data Set - T2 17:12(7/27)						
D1	7.59	3.80	6.40	0.844	0.056	
D2	7.18	3.80	7.20	0.977	0.101	
D3	7.36	3.00	6.40	0.921	0.071	
D4	6.84	4.00	6.00	0.757	0.074	
D5	7.08	3.00	12.40	0.884	0.054	
Data Set - T3 23:38(7/27)						
D1	7.39	3.80	10.40	0.852	0.067	
D2	7.32	1.60	8.40	0.908	0.069	
D3	7.60	1.20	8.80	0.994	0.040	
D4	7.35	2.00	8.80	1.090	0.070	
D5	7.22	2.00	10.80	1.239	0.049	
Data Set - T4 06:23(7/28)						
D1	7.31	1.60	6.00	0.785	0.047	
D2	7.26	2.20	5.60	1.080	0.055	
D3	7.11	2.00	6.00	0.861	0.050	
D4	7.15	1.20	7.60	0.861	0.048	
D5	7.23	1.60	8.00	1.489	0.081	
Data Set - T5 11:50(7/28)						
D1	7.16	1.60	3.20	0.940	0.044	
D2	7.06	2.00	8.00	0.937	0.038	
D3	7.12	1.60	10.80	1.193	0.061	
D4	7.27	2.60	7.60	0.778	0.096	
D5	6.84	2.00	7.20	0.965	0.044	

sea level] 기준)은 15.0 m, 울산만 지점의 수심은 15.0 m 이다.

4.2 물질수지 방정식의 구성 및 적용

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, 관측 시계열자료(Data Set - T1, T2, T3, T4, T5)의

(c) Data in Ulsan Port (Pt. 0: 129° 22' 15E, 35° 26'24N; 2004. 9.2 - 9.3)

Time & Date				
Data Set - T1 17:00(9/2)				
	pH	COD	TN	DO
D1	8.21	0.76	0.294	6.88
D2	8.15	0.94	0.309	6.86
D3	8.16	1.01	0.307	6.86
D4	8.15	0.90	0.311	6.78
D5	8.16	1.02	0.308	6.88
Data Set - T2 01:00(9/3)				
D1	8.16	0.88	0.298	6.83
D2	8.16	0.86	0.299	6.81
D3	8.16	0.84	0.306	6.85
D4	8.14	0.86	0.304	6.83
D5	8.16	0.98	0.289	6.76
Data Set - T3 07:00(9/3)				
D1	8.20	0.82	0.320	6.90
D2	8.19	0.72	0.314	6.80
D3	8.19	0.88	0.317	6.73
D4	8.18	0.98	0.299	6.78
D5	8.18	0.86	0.294	6.91
Data Set - T4 13:00(9/3)				
D1	8.20	0.94	0.299	6.69
D2	8.20	0.84	0.305	6.86
D3	8.18	1.06	0.291	6.81
D4	8.17	0.90	0.303	6.75
D5	8.14	0.98	0.301	6.91
Data Set - T5 19:00(9/3)				
D1	8.21	0.78	0.288	7.26
D2	8.23	0.88	0.308	7.08
D3	8.25	0.86	0.314	7.08
D4	8.25	0.96	0.312	6.92
D5	8.21	0.98	0.289	6.89

관측시기(시간에 따른 조위변화)에 따른 변화를 저감하기 위하여 연속된 자료를 평균하여 평균해수면 기준의 시계열 농도분포자료(Data Set - T12, T23, T34, T45)로 변환하였다. 천수만 영역 및 울산항 영역에서 추정된 매개변수는 평균해수면 기준으로 환산된 자료를 이용하였으며, 연속된 시계열자료를 이용하여 매개변수를 추정하였으며, 추정결과는 시계열 매개변수 자료(Parameter [T1], [T2], [T3])로 제시된다(Fig. 3).

4.3 추정 매개변수 및 변동양상 분석

본 연구에서 제시한 물질수지 방정식을 이용하여 선형 연립방정식을 구성하고, 최소자승법을 이용하여 매개변수를 추정한 결과, 모형 매개변수는 전반적으로 관측시간 및

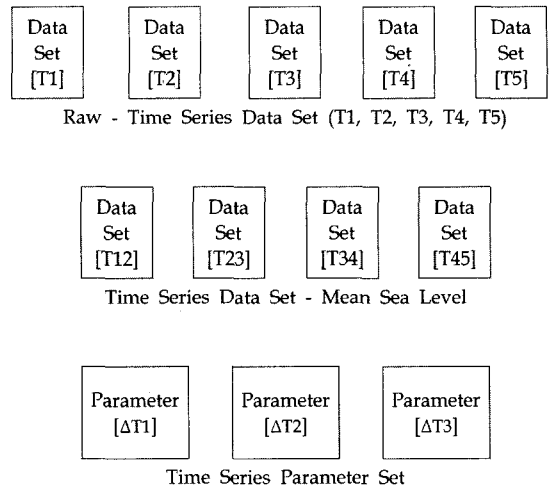


Fig. 3. Schematic Diagram of the Time-Series Data Set and Parameters.

지점에 따라 큰 변화를 보이고 있는 것으로 파악되었다. 천수만 1 지점의 대기로부터의 추정 오염부하량(mg/m²/day)은 COD, SS, TN, TP 항목에 대하여 각각 -1.719, -13.870, 0.518, -0.009이며, 천수만 2 지점에서는 각각 -0.037, 9.060, 0.405, 0.049이다. 반면, 울산항 지점에서의 대기로부터의 오염부하량(mg/m²/day)은 COD, TN, DO 항목에 대하여 각각 -0.178, 0.025, 0.050으로 추정되었다.

한편, 천수만 1 지점의 퇴적물로부터의 오염물질 용출부하량(mg/m²/day)은 COD, SS, TN, TP 항목에 대하여 각각 1.846, 13.655, 0.427, -0.166이며, 천수만 2 지점에서는 각각 -1.918, 1.704, -0.410, -0.048이다. 반면, 울산항 지점에서의 퇴적물로부터의 오염물질 용출부하량은 COD, TN, DO 항목에 대하여 각각 -0.078, 0.035, 0.365로 추정되었다.

4.4 추정매개변수의 신뢰도 분석

추정 매개변수를 이용하여 계산된 오염물질 총량과 관측자료를 이용한 총량을 비교하여, 추정 매개변수를 이용한 방법의 적합성 및 신뢰도를 분석하였다.

RMS (root mean square) 오차를 수질항목별 계산된 질량변화량에 대하여 산정하였으며, 계산된 결과는 COD, SS, TN, TP, DO 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. 한편, Willmott (1981)가 제안한 일치지수(index of agreement) *I_a*를 각

Table 3. Estimated parameters using the inverse problems

(1) Pt. 1 in Cheonsu Bay					
Conc.	Parameters	Time interval			Mean
		ΔT1	ΔT2	ΔT3	
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

(2) Pt. 2 in Cheonsu Bay					
Conc.	Parameters	Time interval			Mean
		ΔT1	ΔT2	ΔT3	
COD	F_A	-15.744	0.037	15.597	-0.037
	F_{DR}	0.861	1.800	-0.479	0.727
	D_V	22.724	-16.131	-0.626	1.989
	F_{BS}	-5.466	-2.862	2.574	-1.918
SS	F_A	-17.193	-1.025	45.399	9.060
	F_{DR}	0.599	0.353	0.160	0.371
	D_V	4.865	-18.303	45.822	10.795
	F_{BS}	-17.757	-2.628	25.497	1.704
TN	F_A	0.732	0.270	0.212	0.405
	F_{DR}	-0.353	-0.097	-0.020	-0.156
	D_V	-9.616	-0.381	12.338	0.780
	F_{BS}	-1.384	-3.114	3.268	-0.410
TP	F_A	0.106	-0.120	0.162	0.049
	F_{DR}	0.624	0.908	-0.244	0.429
	D_V	20.539	-1.999	-5.932	4.203
	F_{BS}	0.083	-0.307	0.079	-0.048

(3) Pt. 0 in Ulsan Port

Conc.	Parameters	Time Interval			Mean
		ΔT1	ΔT2	ΔT3	
COD	F_A	0.501	-0.090	-0.946	-0.178
	F_{DR}	-0.058	-0.195	0.221	-0.011
	D_V	-7.702	9.844	-18.219	-5.359
	F_{BS}	-0.538	0.418	-0.114	-0.078
TN	F_A	0.187	0.027	-0.139	0.025
	F_{DR}	0.000	-0.022	-0.004	-0.008
	D_V	4.662	-29.027	1.793	-7.524
DO	F_{BS}	0.015	0.018	0.073	0.035
	F_A	-0.342	0.788	-0.295	0.050
	F_{DR}	-0.077	-0.005	0.026	-0.019
	D_V	12.181	20.296	-26.566	1.970
	F_{BS}	2.133	-0.141	-0.897	0.365

각의 수질항목에 대하여 계산하였다. 일치지수는 다음 식 (7)과 같이 표현되며, 1.0에 가까워 질수록 추정치가 관측치에 일치함을 의미한다.

$$Ia = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N [P_i - \bar{O}_i + |O_i - \bar{O}_i|]^2} \quad (7)$$

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

COD, SS, TN, TP, DO 항목에 대하여 계산된 일치지수 Ia 는 각각 0.979, 0.987, 0.971, 0.969, 0.993으로 계산결과와 관측결과가 매우 근접한 일치경향을 보이는 것으로 파악되었다.

5. 결론 및 제언

시계열 농도분포자료를 이용하여 수질모형의 매개변수를 추정하는 방법을 제안하였다. 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

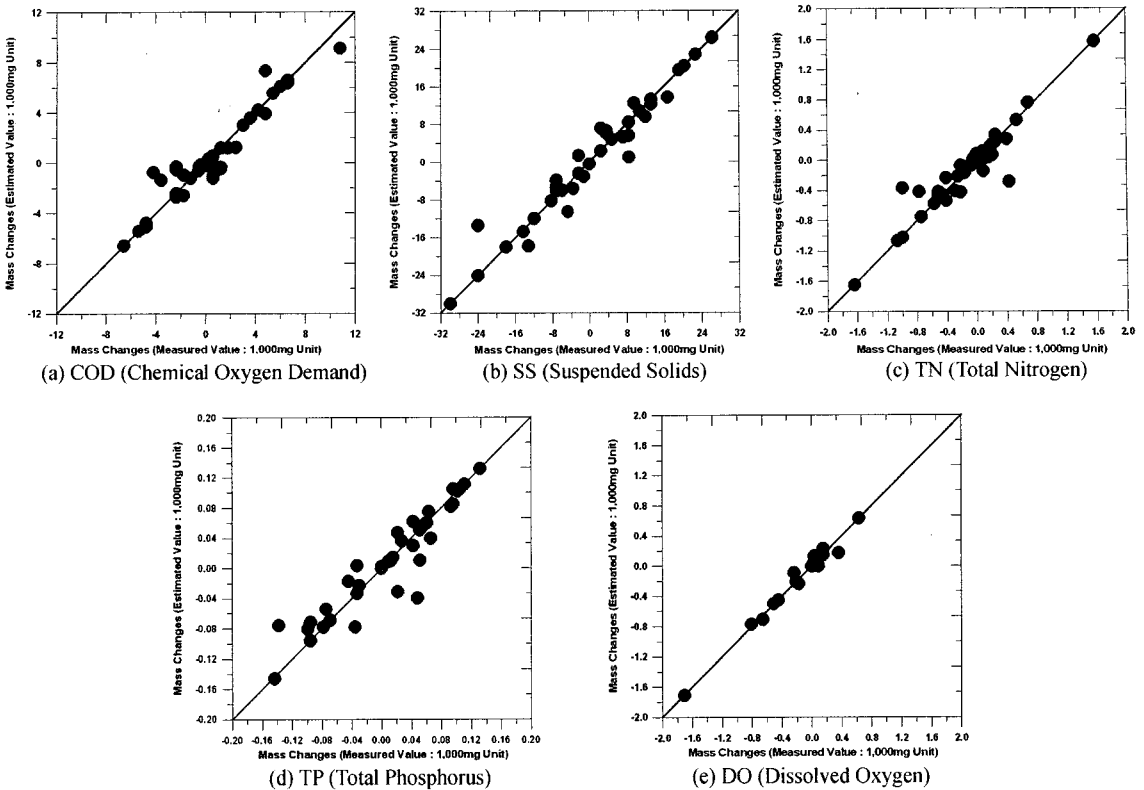


Fig. 4. Comparison of the Measured and Estimated Mass Changes.

최적해를 제공하는 것으로 파악되었다. 따라서, 본 연구에서 제시한 물질 수지방정식을 이용한 수질모형의 매개변수 추정과정은 수학적으로 타당한 방법으로 판단된다. 반면, 매개변수의 시기적인 변동성 및 관측자료에 포함된 관측오차 등을 고려한 추정 및 매개변수의 물리적인 의미 해석 등은 보다 다양하고 정확한 자료 또는 물질 수지 방정식 등을 이용하여 비교·분석하는 연구가 필요할 것으로 사료된다.

본 연구에서 제시한 수질모형 매개변수 추정방법은 물질 수지방정식에서 구성되는 역산문제(inverse problem)를 이용하는 방법으로, 적절한 시계열 농도분포자료를 체계적인 관측을 통하여 확보하면 다양한 연안 수질모형의 구조에 대하여 매개변수를 추정할 수 있으며, 이론적으로도 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 추정된 결과의 신뢰성을 확보하기 위해

서는 가능한 직접 관측결과와의 비교 및 확률이론 등을 통한 불확실성 분석연구가 보다 다양하고 심도 있게 수행되어야 할 것으로 사료된다(Banks & Bihari, 2001). 한편, 적절한 관측계획에 의하여 획득된 자료는 모형의 매개변수 추정 및 환경 지시자(indicator) 파악 등 관측이 곤란한 다방면의 영역에 활용할 수 있으며, 적용범위는 모형의 복잡도에 크게 영향을 받지 않으므로 다양한 구조의 모형에 대하여 적용효과를 검토할 수 있다. 본 연구에서 제시한 방법은 기본적으로 체계적인 관측 및 정확한 자료의 축적이 선행되어야 하며, 관측자료의 품질관리 및 체계적인 설계에 중점을 두어 수행하여야 한다(Hensel, 1991; Menke, 1989). 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.

감사의 글

이 논문은 2004년도 원광대학교의 교비 지원에 의해서 수행되었습니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 조범준 (2001). 역산문제를 이용한 관망에서의 누수탐지. 서울대학교 대학원 공학석사 학위논문.
- 조흥연 (2004). 연안 오염부하량 관측 및 추정기술. 해양정책·R&D동향, R&D Preview, 해양수산부, 한국해양연구원, 20, 21-25.
- 한국해양연구소 (1995). 연안역 이용 및 통합관리를 위한 연구(I). 제1차년도 보고서, 해수유동 및 수질모델링분야 (채장원 등), BSPN 00260-807-6, 과학기술처.
- 한국해양연구소 (1996). 연안역 이용 및 통합관리를 위한 연구(II-III). 제2·3차년도보고서, 해수유동 및 수질모델링분야 (채장원 등), BSPN 00322-968-7, 과학기술처.
- 한국해양연구소 (1997). 진해·마산만 수질환경 관리모델 개발(I). 제1차년도 연차보고서, BSPE 97607-00-1040-2, 해양수산부.
- 한국해양연구소 (1999a). 진해·마산만 수질환경 관리모델 개발(II). 제2차년도 연차보고서, BSPE 98703-01-1147-2, 해양수산부.
- 한국해양연구소 (1999b). 진해·마산만 수질환경 관리모델 개발(III). 제3차년도 최종보고서, 해양수산부.
- Ancey, C., Meunier, M. and Richard, D. (2003). Inverse problem in avalanche dynamics models. *Water Resources Research*, 39(4), ESG 5-1 - 5-13
- Banks, H.T. and Bihari, K.L. (2001). Modelling and estimating uncertainty in parameter estimation. *Inverse Problems*, 17, 95-111.
- Bennett, A.F. and McIntosh, P.C. (1982). Open ocean modeling as an inverse problem: Tidal theory. *J. of Physical Oceanography*, 12(10), 1004-1018.
- Gaspar, P., Andre, J.C. and Lefevre, J.M. (1990). The determination of the latent and sensible heat fluxes at the sea surface viewed as an inverse problem. *J. of Geophysical Research*, 95(C9), 16169-16178.
- Hensel, E. (1991). *Inverse Theory and Application for Engineers*. Prentice-Hall Inc.
- Jorgensen, S.E. and Gromiec, M.J. (Editor) (1989). *Mathematical submodels in water quality systems. Developments in Environmental Modelling*, 14, Elsevier.
- Lee, K.S. (2000). *Fundamentals of Water Resources Systems*. Saeron Publishing Co., 117.
- Lee, H.K. (1994). Wind-driven circulation using a curvilinear hydrodynamic three-dimensional model. *J. of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 6(1), 1-11.
- Legovic, T., Limic, N. and Valkovic, V. (1990). Estimation of diffuse inputs to a coastal sea: Solution to an inverse modeling problem, *Estuarine. Coastal and Shelf Science*, 30(6), 619-634.
- Menke, W. (1989). *Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory*. Academic Press.
- Scales, J.A., Smith, M.L. and Treitel, S. (2001). *Introductory Geophysical Inverse Theory*. Samizdat Press.
- Strang, G. (1980). *Linear Algebra and Its Applications*. Second Edition, Academic Press.
- Willmott, C.J. (1981). On the validation of models. *Physical Geography*, 2(2), 184-194.

Received December 17, 2004

Accepted July 5, 2005