

# 사행하천에서 오염물질의 2차원 거동특성 해석 Analysis of Two-Dimensional Pollutant Transport in Meandering Streams

오 정 선\* / 서 일 원\*\* / 김 영 한\*\*\*

Oh, Jung Sun / Seo, Il Won / Kim, Young Han

## Abstract

In this study, RMA2 and RMA4, the 2-D depth-averaged models, were employed to simulate the two-dimensional mixing characteristics of the pollutants in the natural streams. The velocity and depth were first calculated using RMA2, 2-D hydrodynamic model, and then the resulting flow field was inputted to RMA4, 2-D water quality model, to compute the concentration field. RMA models were verified using the velocity and concentration data measured in S-curved meandering channel. The results showed that the RMA2 model simulated well the phenomenon that the maximum velocity line is located at the inner bank of meandering channel, and the RMA4 model was well adapted to reproduce the general mixing behavior and the separation of tracer clouds. Comparing model simulations with measured data in the field experiments, RMA2 model simulated well general flow field and tendency that the maximum velocity line skewed toward the outer bank which were found in field experiments. The simulations of RMA4 model showed that the center of the tracer cloud tends to follow the path in which the maximum velocity occurs. In this study, the dispersion coefficients are fine-tuned based on the measured coefficients calculated using field concentration data, and the results show reasonable agreement with predictive equations.

**keywords** : meandering streams, pollutant transport, 2-D numerical model, velocity distribution, dispersion coefficient

## 요 지

본 연구에서는 사행하는 자연하천에 유입된 오염물질의 2차원 확산 특성을 모의하기 위하여 2차원 수심적분 모형인 RMA2와 RMA4를 사용하였다. 먼저 2차원 동수역학적인 모형인 RMA2를 사용하여 흐름장을 모의한 후 이 결과를 2차원 수질모형인 RMA4에 입력하여 농도장을 모의하였다. 수치모형을 S자형 사행수로에서 측정한 흐름 및 추적자 농도자료를 이용하여 검증한 결과, RMA2 모형은 최대유속선이 만곡의 내측에 치우쳐 나타나는 현상을 잘 모의하고 있었으며, RMA4 모형은 오염운의 전반적인 확산 특성과 분리 현상을 적절하게 모의하고 있었다. 수치모형을 실제 하천에 적용하여 현장 실험 결과를 비교한 결과, RMA2 모형은 전체적인 흐름 특성 및 만곡의 외측 제방으로 치우치는 최대유속선의 경향 등을 잘 모의하였으며, RMA4 모형은 오염운이 최대유속선을 따라 이동하는 경향 등을 적절하게 재현하는 것으로 밝혀졌다. 본 연구에서 분산계수는 실측 농도분포로부터 계산한 값을 미세 조정하여 사용

\* 정희원, 서울시정개발연구원 연구원, 공학석사

Researcher, Seoul Development Institute, Seoul 137-071, Korea (E-mail: jenni@sdi.re.kr)

\*\* 정희원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수, 공학박사

Professor, School of Civil & Geosystem Eng., Seoul National University, Seoul 151-742, Korea  
(E-mail: seoilwon@snu.ac.kr)

\*\*\* 정희원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 계약교수, 공학박사

Contract Professor, School of Civil & Geosystem Eng., Seoul National University, Seoul 151-742, Korea  
(E-mail: yhkim98@snu.ac.kr)

하였으며, 이는 기존의 추정식에 의한 추정치와도 잘 부합하는 것으로 밝혀졌다.

**핵심용어** : 사행하천, 오염 확산, 2차원 수치모형, 유속분포, 농도분포, 분산계수

## 1. 서 론

경제성장과 인구증가로 인해 용수 수요가 증대되면서, 이용률이 가장 높은 수자원인 하천수의 흐름 및 수질에 대한 관리가 중요하게 대두되었다. 이러한 관리 계획을 수립함에 있어 필수적인 요소가 하천의 수리학적 흐름 특성과 오염물의 거동 특성을 파악하는 것이다. 수리학적 특성 및 오염 거동 특성을 예측·모의하기 위하여 여러 가지 수치해석 기법이 도입되고 있는데, 이러한 수리학적 특성의 수치해석에 관한 연구는 현재까지도 진행되고 있으며, 상용화된 모형도 여러 가지가 있다.

2차원 모형인 RMA 모형은 유한요소모형으로서 하천의 지형학적 특성을 효과적으로 반영할 수 있어, 이미 그 적용성을 인정받은 바 있다. 하천에서의 동역학적인 흐름 및 오염물 확산 거동 해석을 위한 유한요소법은 유한차분법에 비하여 경제처리가 용이하여 King과 Norton(1978), Norton(1980), King(1997) 등 많은 연구가 수행되어 왔다. RMA 모형을 흐름 및 오염물 확산 해석에 적용한 사례는 Gee와 Wilcox(1985)가 하천 흐름에 적용한 이후, 국내에서도 박무종 등(1994)이 RMA4 모형을 한강 하류부에 적용하여 2차원 모형의 적용성을 고찰한 바 있다. 그러나 이러한 연구 사례들은 실험치와의 비교 및 검증 측면의 연구가 부족하였으며, 자연하천에서의 적용성 측면에서의 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 청미천 등 사행하는 자연하천에 RMA2 모형 및 RMA4 모형을 적용하여 하천의 흐름 상태 및 오염물의 확산 거동을 모의·예측하였다. 수치모형을 검증하기 위해서 사행수로에서 수행된 실험결과를 이용하였다. 나아가서 수치모형을 실제 사행하천에 적용하여 모의치를 관측치와 비교함으로써 모형의 현장 적용성을 입증하였다.

## 2. 수치모형

### 2.1 SMS 모형의 개요

SMS(Surfacewater Modeling System)는 1차원, 2차원, 그리고 3차원의 동수역학적 모델에 대한 종합적인 전처리 및 후처리 프로세서이다(ECGL, 1995). SMS는 2차원 유한요소, 2차원 유한차분, 3차원 유한요소 등에

대한 모델링 도구를 포함한다. SMS가 지원하는 모델은 미공병단 수로실험국 (U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station)의 TABS-MD (GFGEN, RMA2, RMA4, SED2D-WES), ADCIRC, CGWAVE, STWAVE, M2D, HVEL2D, 그리고 HEC-RAS 모델 등이다. 또한 미연방도로국 (U.S. Federal Highway Administration)에서 개발한 2차원 수리동력학 및 오염원이송 유한요소모델인 FESWMS와 Bri-Stars를 지원한다.

### 2.2 RMA2 모형의 지배방정식 및 수치기법

RMA2는 2차원 수심 평균한 유한요소 수리동역학적 수치모델이다(WES, 1996; King, 1997). 이는 상류(sub-critical) 및 자유수면 흐름의 수위와 수평 방향의 2차원 유속 성분을 계산한다. RMA2는 처음 1973년 Norton, King 그리고 Orlob 에 의해 개발된 이래로, 하중도를 포함하는 하천 수로, 교각 부근 흐름, 유수단면 확대 및 축소부를 포함하는 하천구간의 흐름 등 여러 수체의 일반적인 수위와 흐름 분포를 계산하는 데에 적용되어왔다. RMA2는 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식을 2개의 수평방향에 대하여 수심 적분한 식을 지배방정식으로 하며, 이는 다음 식 (1)~(3)과 같다.

$$\begin{aligned} h \frac{\partial u}{\partial t} + hu \frac{\partial u}{\partial x} + hv \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left( \epsilon_{xx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \epsilon_{xy} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \\ + gh \left( \frac{\partial a}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{n^2 g u}{h^{1/3}} \sqrt{(u^2 + v^2)} \\ - \zeta V_a^2 \cos \psi - 2h w v \sin \phi = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} h \frac{\partial v}{\partial t} + hu \frac{\partial v}{\partial x} + hv \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left( \epsilon_{yx} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \epsilon_{yy} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \\ + gh \left( \frac{\partial a}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{n^2 g v}{h^{1/3}} \sqrt{(u^2 + v^2)} \\ - \zeta V_a^2 \sin \psi + 2h w u \sin \phi = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

여기서,  $u$ ,  $v$ 는 직교좌표계에서의 수심 적분한 수평흐름속도,  $x$ ,  $y$ ,  $t$ 는 직교좌표계 및 시간,  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $\epsilon$ 는 와점성계수,  $a$ 는 하상고,  $h$ 는 수심,  $g$ 는 중력 가속도,  $n$ 은 Manning 조도계수,  $\zeta$ 는 바람에 의한 전단계수,  $V_a$ 는 풍속,  $\psi$ 는 풍향,  $\phi$ 는 국지위도,  $\omega$ 는 지구의

회전 각속도를 나타낸다. RMA2는 지배방정식에서 알 수 있듯, 하상에 의한 마찰, 바람, 난류, 지구자전력 등의 효과도 고려할 수 있다. 마찰은 Manning 식이나 Chezy의 식에 의해 계산되고, 와점성계수는 난류 특성을 정의하는 데에 사용된다. 또한, 정상류 상태는 물론 유입유량곡선, 조류, 해일 등으로 인한 부정류의 동적 상태도 모의 가능하다.

RMA2 모형은 수치기법으로 가중잔차 Galerkin 법을 사용하여 해를 구하는 유한요소모형이다. 형상함수는 유속에 대해서는 2차 함수이며, 수위에 대해서는 1차 함수로 혼합보간기법이 적용된다. 공간에 대한 적분은 가우시안 적분법을 사용하며, 시간에 대한 미분은 비선형 유한차분 근사법을 사용한다. 해를 구하기 위하여 완전 음해법을 사용하며, 반복 계산법으로는 각 시간 단계에서의 비선형 연립방정식을 Newton-Raphson 수렴 방법을 사용하여 푼다.

### 2.3 RMA4 모형의 지배방정식 및 수치기법

RMA4는 2차원 수심 평균된 수질예측 유한요소 모델이다. 이는 대상 영역에서 보존성 또는 비보존성 물질이 유입되었을 때 농도를 계산할 수 있다. RMA4는 처음 1973년 Norton, King 그리고 Orlob 에 의해 개발된 이후, 수체에서의 오염물질 거동 해석에 적용되어왔다. RMA4 모형은 비압축성 유체에서 보존성 물질의 3차원 이송-확산 방정식을 수평의 두 방향에 대하여 수심적분한 2차원 이송-확산 방정식을 지배방정식으로 사용하며 이는 다음 식과 같다.

$$h \left( \frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} + V \frac{\partial C}{\partial y} - K_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - K_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - \sigma + kc \right) = 0 \quad (4)$$

여기서,  $C$ 는 물질의 농도,  $K_x$  와  $K_y$ 는 각 각 종분산계

수(longitudinal dispersion coefficient)와 횡분산계수(transverse dispersion coefficient)이며,  $\sigma$ 는 물질의 질량 공급원,  $kc$ 는 생·화학적 반응에 의한 물질의 소멸율을 나타낸다. RMA4는 주어진 격자의 유속장을 정의하기 위하여 RMA2의 유체 동역학의 해를 사용하며, 수치기법은 RMA2와 동일하다.

## 3. 모형의 검증

### 3.1 실험실 실험

모형의 현장 적용에 앞서 수로의 사행, 여울-소 구조, 불규칙성 등이 존재하는 자연하천에 RMA 모형을 적용하는 것이 타당한지에 대한 검증을 실시하였다. 검증의 대상은 그림 1과 같은 자연하천의 모양을 형상화한 직사각형 단면의 교호사행(alternative meander) 수로로서, 여기에서의 실험 결과(서일원 등, 2004)와 비교·검증하였다. 사행수로의 폭은 1 m, 길이는 15 m로, 중심 각 120°의 사행구간 2개와 만곡부를 연결하는 직선구간으로 구성되어 있다. 유속 측정에는 ADV (Acoustic Doppler Velocimeter)를 이용하였으며, 농도 측정에는 전기전도도계를 사용하였다. 오염물질 추적자는 메탄올로 비중을 1로 맞춘 NaCl 용액을 사용하였다. 실험조건은 선오염원의 하폭중앙 순간주입으로 표 1과 같으며 이중 Case 201과 Case 301을 대표케이스로 선정하여 검증에 사용하였다.

### 3.2 검증 결과

조도(n) 등의 매개변수를 실험수로의 재료에 의한 값으로 주어 유속을 모의한 결과, 그림 2~3과 같이 전체적인 유속 분포가 실험결과와 유사하게 나타났다. 만곡부가 교호적으로 나타나는 S자형 사행수로에서 측정된 실험 자료의 경우, 직선부(S1, D5, U5)에서는 유속분포가 대칭적으로 발생하며, 첫 번째 만곡부(D1~D4)에서는

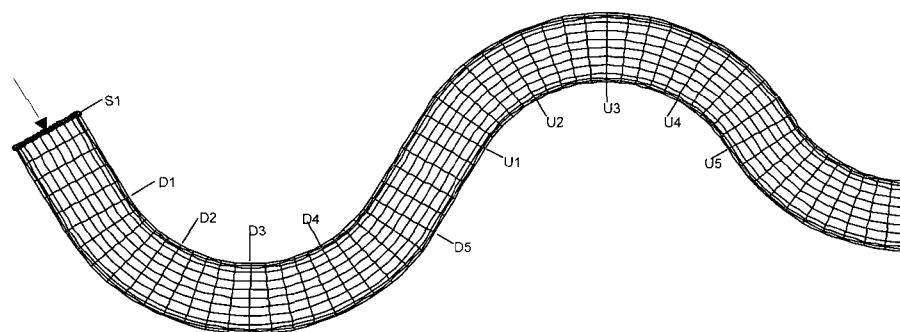


그림 1. S자형 사행수로에 대한 유한요소망 및 축선

표 1. 실험조건

Case	$H$ (cm)	$V$ (cm/s)	$W/H$	$Fr$
070	7	28.6	14.3	0.34
101	10	30	10	0.30
151	15	20	6.67	0.16
152	15	40	6.67	0.33
201	21	14.3	4.8	0.11
202	21	28.6	4.8	0.21
203	21	42.9	4.8	0.32
301	30	10	3.3	0.06
302	30	20	3.3	0.12
303	30	30	3.3	0.17
402	40	15	2.5	0.08

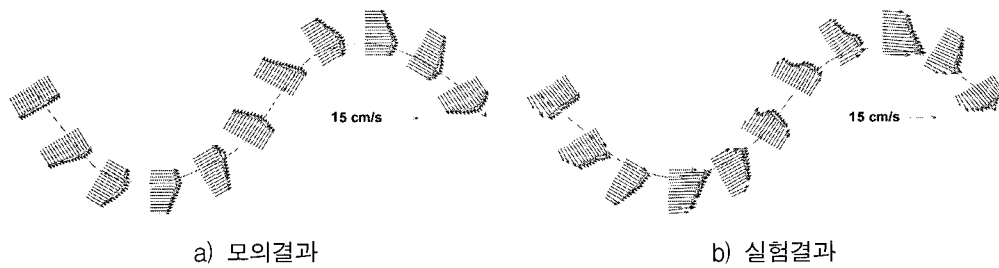


그림 2. 사행수로에서 유속분포의 비교 (Case 201)

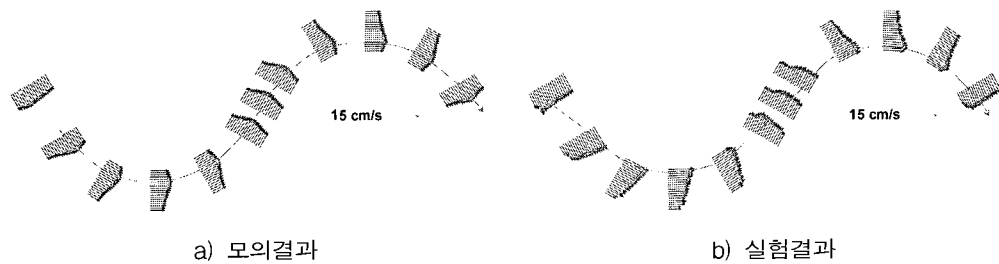


그림 3. 사행수로에서 유속분포의 비교 (Case 301)

최대유속이 좌안 (만곡의 내측)으로 치우쳐 나타나다가, 이어지는 직선부에 이르면 수로 중앙으로 이동하며, 두 번째 만곡부 (U1~U4)에서 우안 (만곡의 내측)에 접근하여 발생하고 있다. 이러한 흐름 현상은 사행이 발달한 자연하천에서 일어나는 현상 (만곡부에서 최대유속이 만곡의 외측에 치우쳐서 발생하는 현상)과는 상이한 것으로서, 이는 실험수로의 단면이 자연형 단면이 아니고 직사각형 단면이기 때문인 것으로 제안되고 있다 (서일원 등, 2004). 수치모형에 의한 모의치도 이러한 거동을 매우 잘 모의하고 있다. 실험결과에서 최대유속이 발생하는 지점을 연결한 최대유속선은 S자형 사행수로의 최단거리를 통과하는 것으로 나타나는데, 모의치는 이러한 실험결과를 적절하게 재현하고 있다.

농도 모의에서 분산계수( $K_x$ ,  $K_y$ )는 실험으로부터 계

산된 값 (Baek, 2004)을 미세 조정하여 사용하였다. Baek(2004)은 본 연구의 검증자료로 이용한 사행수로 추적자 농도자료를 분석하여 횡분산계수 실측치를 구간별로 산정한 바 있다. 그러나 본 연구의 수치모의에서는 케이스별로 단일한 횡분산계수를 입력하였기 때문에 구간별 확산 특성을 세부적으로 반영하지 못 하는 단점이 발생한다. 따라서 필요한 경우, 초기 입력한 분산계수값에서 미량의 변화를 주어서 모의된 농도분포가 측정된 농도분포와 보다 적합하게 일치하도록 하였다. 그림 4~5에서 실험자료의 경우, S자형 사행수로에서 이동하는 추적자의 농도장은, 상술한 유속장의 특성을 반영하며, 첫 번째 만곡부에서 좌안 (내측 제방)에 붙어서 이동하다가, 두 번째 만곡부에서는 우안 (내측 제방)에 근접하여 이동하고 있는데, 수치모형에 의한 모의치는

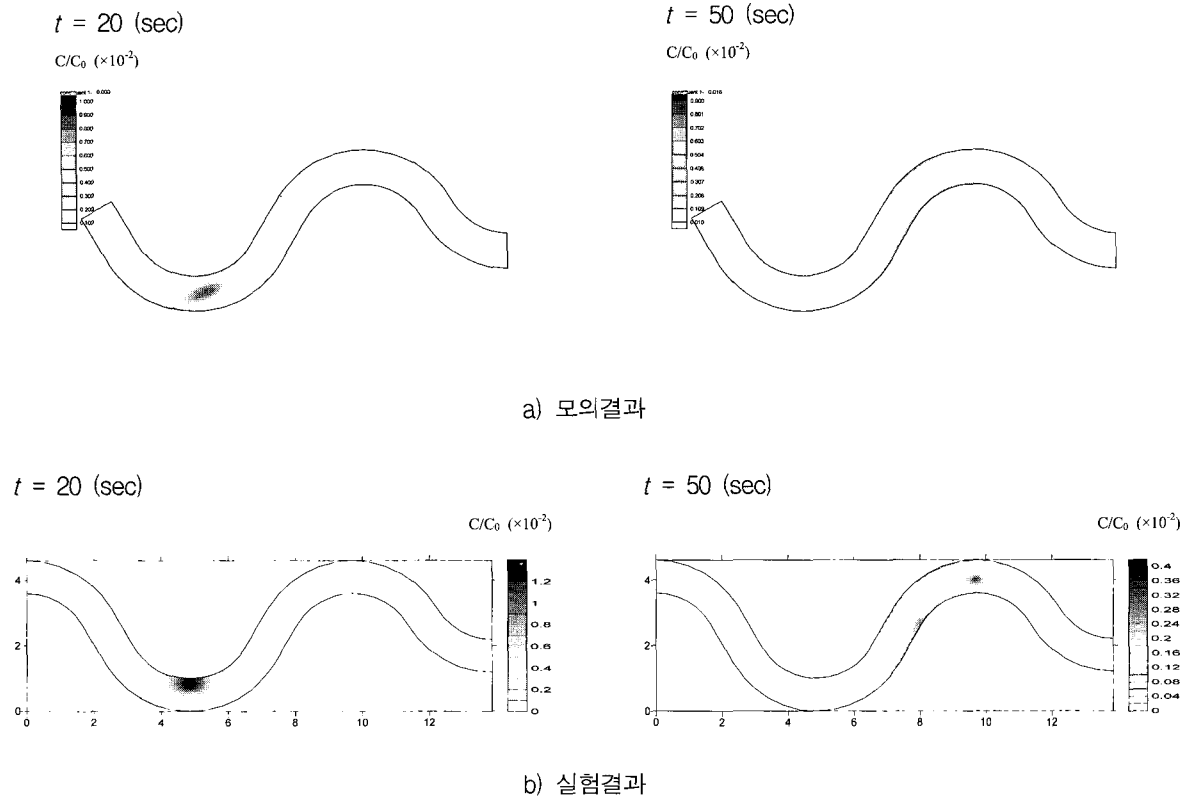


그림 4. 사행수로에서 추적자 오염원의 농도장 비교 (Case 201)

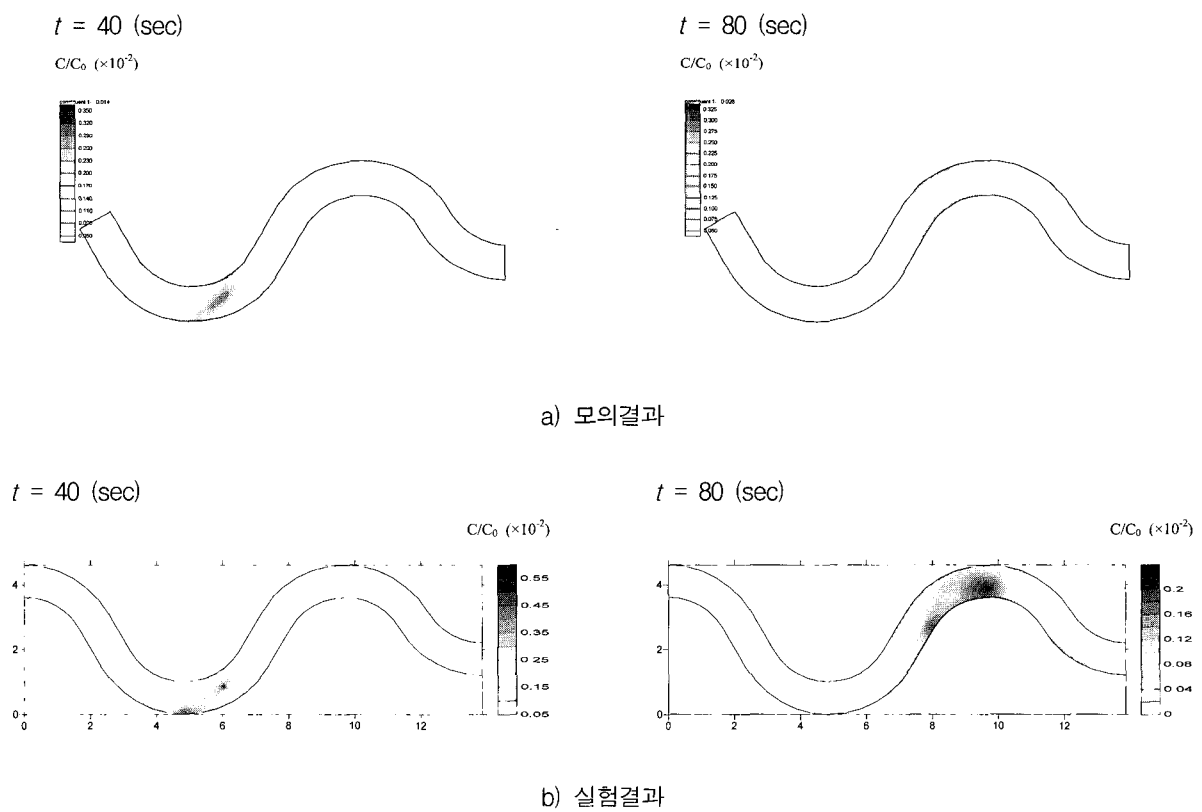


그림 5. 사행수로에서 추적자 오염원의 농도장 비교 (Case 301)

이러한 오염물질의 확산거동을 적절하게 모의하고 있다. 또한 실험결과에 경우, 오염운이 첫 번째 만곡부를 지나면서 오염운이 두 개로 분리되는 현상을 보이기도 하는데, 모의치도 이러한 거동을 어느 정도 재현하고 있음을 알 수 있다. 이러한 오염운의 분리현상은, 앞에서 상술한 바와 같이, 교호적으로 연속되는 만곡부에서 최대유속이 발생하는 지점이 좌, 우로 교차되면서 일어나는 현상으로서, S자형 사행수로에서의 오염물질의 거동 해석에 포함되어야 할 매우 중요한 메카니즘이다. 상술한 결과로부터 본 연구에서 선정한 2차원 수치모형인 RMA2와 RMA4는 사행수로의 흐름 및 오염물의 확산 거동을 모의하는 데에 비교적 적합한 모형으로 판단된다.

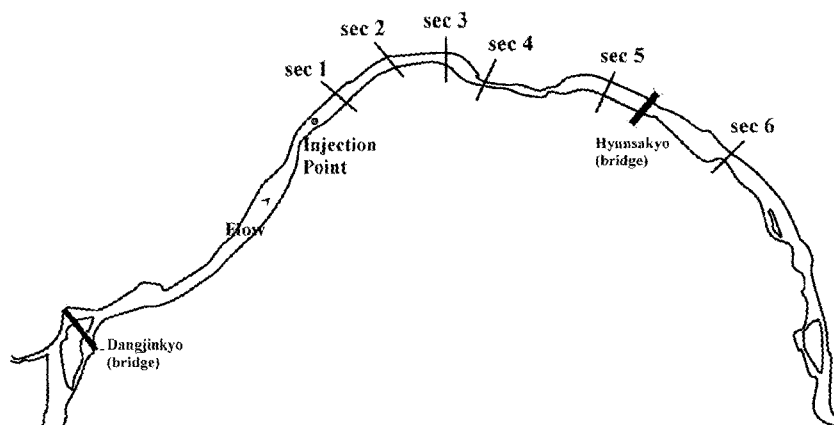
#### 4. 모형의 적용

##### 4.1 대상하천 및 현장실험

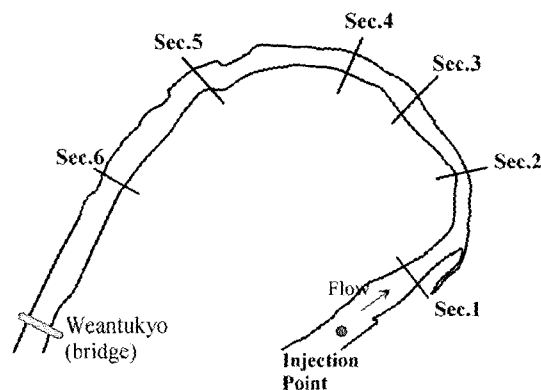
수치모형의 현장 적용성을 검토하기 위한 자료로서, 서일원 등 (2003)에 의해 수행된 현장 실험 자료 중 남

한강 지류 중 청미천 및 북한강 지류 중 홍천강 자료를 이용하였다. 청미천의 대상구간은 경기도 여주시 점동면 현수리의 당진교 하류 만곡부를 포함한 구간으로, 실측 수리량이 존재하는 2 km 정도의 구간이며, 홍천강의 대상구간은 강원도 홍천군 남면의 만곡부를 포함한 약 2 km의 구간이다. 그림 6에 대상구간 및 측선 등을 간략히 도시하였다.

하천 현장실험 방법은 흐름방향과 직각으로 양안에 말뚝을 박고 양쪽을 로프로 연결하여 측선을 설치하였다. 측선별 간격은 약 200 ~ 400 m로 하여, 대상 구간에 모두 6개의 측선을 설치하였다(그림 6 참조). 이를 기준으로 각 측선별로 수심, 유속, 추적자의 농도를 측정하였다. 각 단면별 수심 및 유속을 측정하기 위하여 현장용 유속계의 하나인 초음파 유속계 (Acoustic Doppler Current Profiler; ADCP)를 사용하였다. ADCP은 수심이 30 cm 이상 보장되어야 하므로, 수심이 얇은 곳에서는 전자기 유속계(electro-magnetic flowmeter)를 사용하여 유속을 측정하였다.



a) 청미천



a) 홍천강

그림 6. 청미천 및 홍천강 대상구간

수심 및 유속측정이 완료된 후에 동일한 측선에 대해 추적자실험이 수행하였다. 추적자로써 미량으로도 감지가 용이하며, 물과의 비중 차이가 거의 없는 방사성 동위원소 중의 하나인 I-131을 사용하였다. 주입방법은 2차원 해석을 위하여 연직방향으로 농도가 일정한 선원, 횡방향으로는 점원형태로 하폭의 중앙에 순간 주입하였다. 측정은 단면 당 평균 10개의 측정점에서 감지기를 고정시켜 1점법(0.6 h)으로 초당 10개의 자료를 독취하였다. 주입전 5분 동안은 기저농도를 측정하였으며, 주입 후 최대농도가 통과한 후 기저농도로 감소될 때까지 측정을 계속하였다 (서일원 등, 2003).

## 4.2 수치모형의 경계조건 및 매개변수 입력

대상구간에 대한 유한요소망을 구성하기 위해서, 실측 수심 자료와 선형보간법을 이용하여 하상 형상을 구성하였다. 측선에서의 값을 대입 또는 비교하기 위해서 사각형 요소망이 유용하다고 생각되어 대부분 사각형 요소로 2000여 개의 요소를 구성하였다. 본 연구에서 RMA2 모형의 모의는 정상류 상태 모의에 국한되며, 상류 경계조건으로는 대상구간 평균 유량을, 하류 경계조건으로는 수위를 사용하였다. RMA4 모형의 모의는 실험과의 비교를 위하여 보존성 물질의 순간주입조건으로 하였다.

주목할 만한 점은, 먼저 RMA2 모형의 특성상 하상고가 높을 때 젖음(wet) 또는 마름(dry)을 모의하는 데에 어려움은 없지만, 결과적으로 마름이 나타난 요소와 젖음이 나타난 요소가 번갈아 나타날 때에는 요소가 아주 작지 않으면 매끄러운 경계를 기대하기란 어렵다. 따라서 젖음-마름 모의를 이용하여 경계를 지정해주고 싶다면, 유한요소망을 매우 조밀하게 하여야 적절한 경계형태를 얻을 수 있다. 젖음 또는 마름을 모의하지 않는다면 수심이 작아지는 부분에서 수치적 불안정이 야기될 수 있어 계산이 수렴하지 않을 수 있다. 본 모의에서는 특별히 하천 내에 하중도가 있지는 않으므로 젖음 또는 마름을 나타나지 않도록 모의하고, 그를 위하여

수치적으로 안정적이 될 만큼의 양안의 경계수심을 보장하였다. 모형의 매개변수인 조도계수, 와점성계수는 보정을 통하여 각각 0.033, 30 정도로 결정하였다. 본 연구에서는 보다 현실적인 모의를 위하여 양안 부분과 하도 중앙 부분의 매개변수를 달리 주었다. 즉 양안의 경우, 바닥뿐만 아니라 벽면이 있어 마찰에 의한 유속 감소가 다른 부분보다 두드러지므로 조도계수를 일반 하도 보다 크게 입력하였는데, 기존 연구자들이 제안한 값을 참고하여 0.05 정도를 입력하였다.

본 연구에서와 같이 RMA4 모형을 적용하여 실제 자연하천의 확산 특성을 실제에 가깝게 모의하기 위해서는 매개변수인 종·횡분산계수를 적절하게 입력하는 일이 중요하다. 특히 본 연구의 대상하천과 같이 사행이 두드러진 하천의 경우, 사행에 따른 2차류의 영향과 국부적인 불규칙성으로 인한 3차원적 흐름 효과를 분산계수에 포함되도록 하여야 한다. 본 모의에서는 횡분산계수의 경우, Baek(2004)에 의해 실측농도 분포로부터 계산된 값을 이용하였고, 종분산계수는 Elder(1959)의 추정식을 이용하였다. 이렇게 입력한 분산계수는 모의치를 실측치에 보다 근사하게 일치시키기 위하여 미세하게 조정하였다. 표 2에 본 모의에 최종 사용한 분산계수 값을 수록하였다. 모의에 사용된 횡분산계수를 기존의 추정식으로부터 나온 값과 비교하기 위하여 다음과 같은 Sayre (1979)의 추정식을 도입하였다.

$$K_y/HU_* = (0.3 \sim 0.9) \left( \frac{UW}{U_* R_c} \right)^2 \quad (5)$$

여기서,  $H$ 는 하천의 평균 수심,  $U_*$ 는 전단유속,  $W$ 는 하폭,  $R_c$ 는 사행반경을 나타낸다. 표 2에 제시한  $K_x$ ,  $K_y$ 의 경우, 흐름 방향 및 흐름에 직각인 방향에 대한 분산계수이므로, 실제로 RMA4 모형의 매개변수로 입력시 하천의 사행이 심한 홍천강의 경우 구간을 분리하여 주흐름 방향의 분산계수를  $K_x$ 로 하고, 흐름에 직각 방향인 분산계수를  $K_y$ 로 입력하였다.

표 2. 수치모의에 이용한 종·횡분산계수

	$K_x/HU_*$		$K_y/HU_*$	
	청미천	홍천강	청미천	홍천강
수치모의에 사용한 값	4.94	5.42	0.33	0.41
실측치 (Baek, 2004)	-	-	0.34	0.47
추정식에 의한 값	5.93 (Elder, 1959)		0.36 (Sayre, 1979)	0.52 (Sayre, 1979)

### 4.3 결과 및 분석

그림 7~8에 청미천 및 홍천강 실험 구간에서 측정 한 유속 자료와 수치모형에 의해 계산된 모의치를 비교 하여 도시하였다. 그림 7에서 청미천의 실험결과는 만곡의 중심부 (측선 2, 3)에서는 만곡의 외측 제방 (좌안)에 치우쳐서 수심이 깊어지며 내측 제방(우안)으로 올수록 수심이 얕아지는 현상이 발생하고 있다. 이에 따라 최대유속도 외측 제방 쪽으로 편기하여 나타나고 있음을 보여주고 있다. 따라서 이러한 측선 (측선 2, 3)에서는 유속의 횡분포가 왜곡되어 나타난다. 그러나 비교적 직선부에 위치한 측선 (측선 4, 6)에서는 수심 및 유속 모두 단면 중앙에서 크고, 양안으로 갈수록 작아지는 대칭적인 형태를 보이고 있다. 수치모형에 의한 모의치도 이러한 경향을 대체적으로 재현하고 있으나, 유속의 편기가 심한 측선 2와 같은 경우에는 실측치를 완벽하게 모의하지 못하는 것으로 나타났다. 또한 국부

적으로 유속이 심하게 변동하는 측선 1과 같은 경우, 모의결과가 실측치와 차이가 있게 나타나고 있는데, 이는 수치모형에서 실제 하천의 3차원적인 지형 변화, 불규칙성 등을 완벽하게 포함시키지 못하기 때문인 것으로 판단된다. 그림 8에 도시한 홍천강의 경우도 청미천의 결과와 유사하게 나타났는데, 수치모형은 만곡부 (측선 3, 4, 5)에서의 유속의 편기 현상을 대체적으로 적절하게 모의하고 있으나, 하천의 불규칙성 등으로 인한 국부적인 유속 변화는 완벽하게 재현하지 못하고 있는 것으로 나타났다.

청미천 및 홍천강에서 수행한 추적자 실험 결과 실험 측정도 분포를 모의치와 비교하여 그림 9~10에 도시하였다. 이 그림들에서 농도값은 방사성 동위원소의 반감기와 기저농도를 고려하여 환산한 값을 이용하였다 (서일원 등, 2003). 또한 상대적인 비교를 위하여 초기 주입농도로 나누어서 무차원량으로 표시하였다. 그림 9에 도시한 청미천 추적자 실험 결과의 경우, 실험구간 중

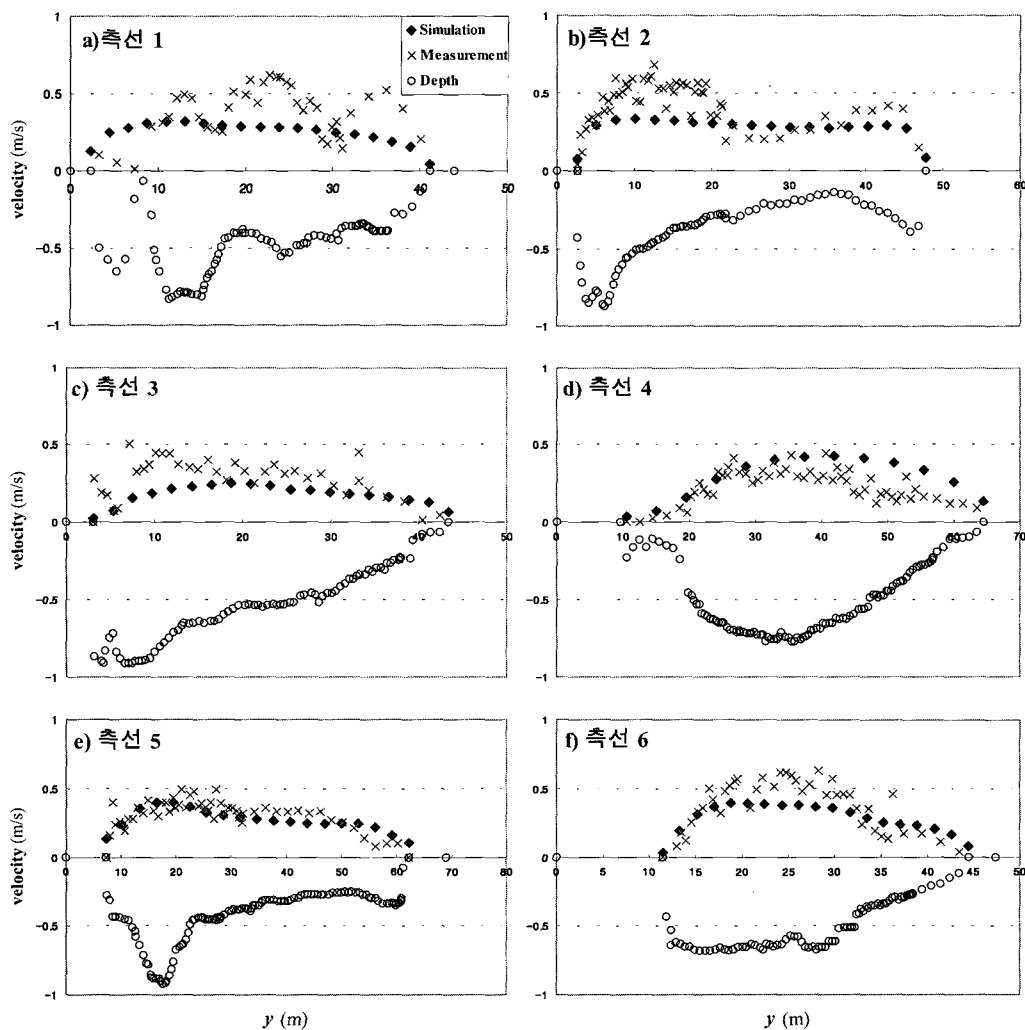


그림 7. 청미천 유속의 모의치 및 실험치



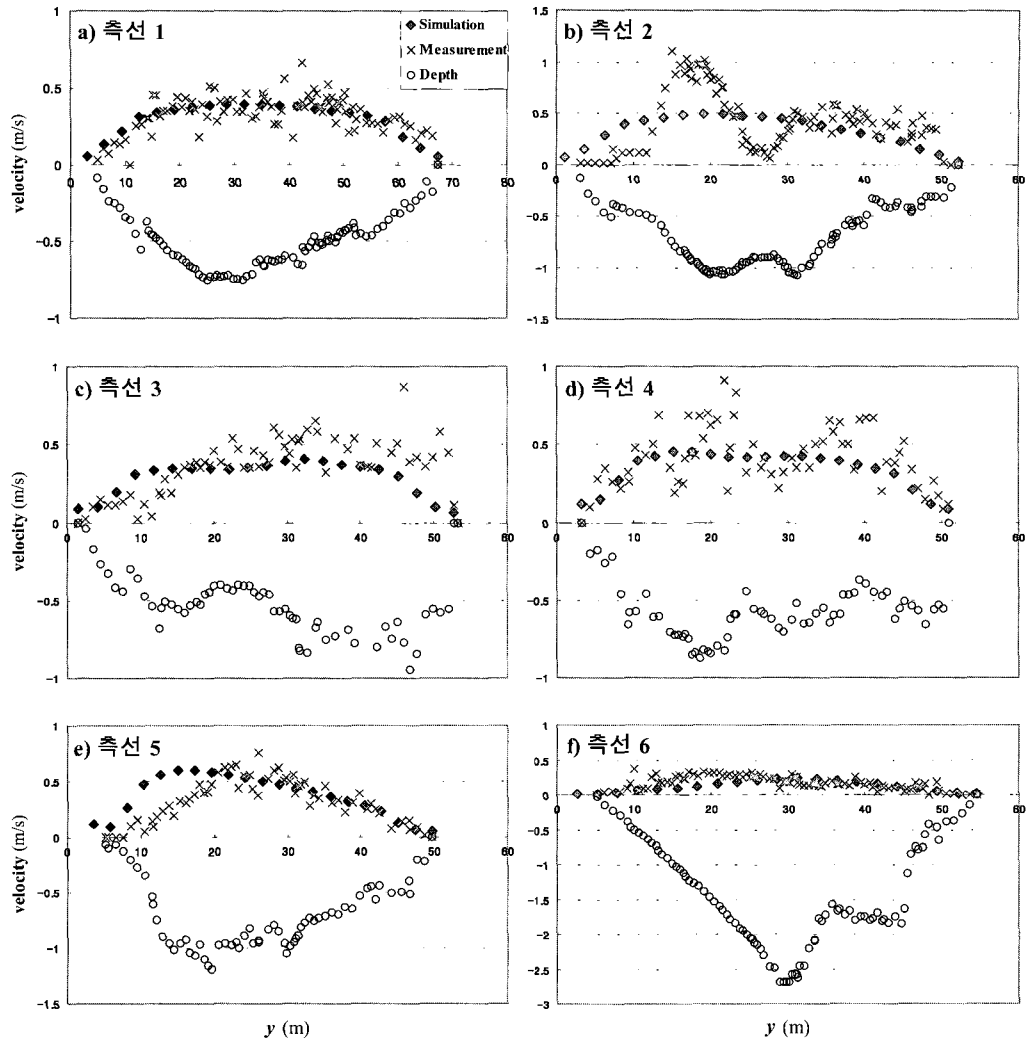


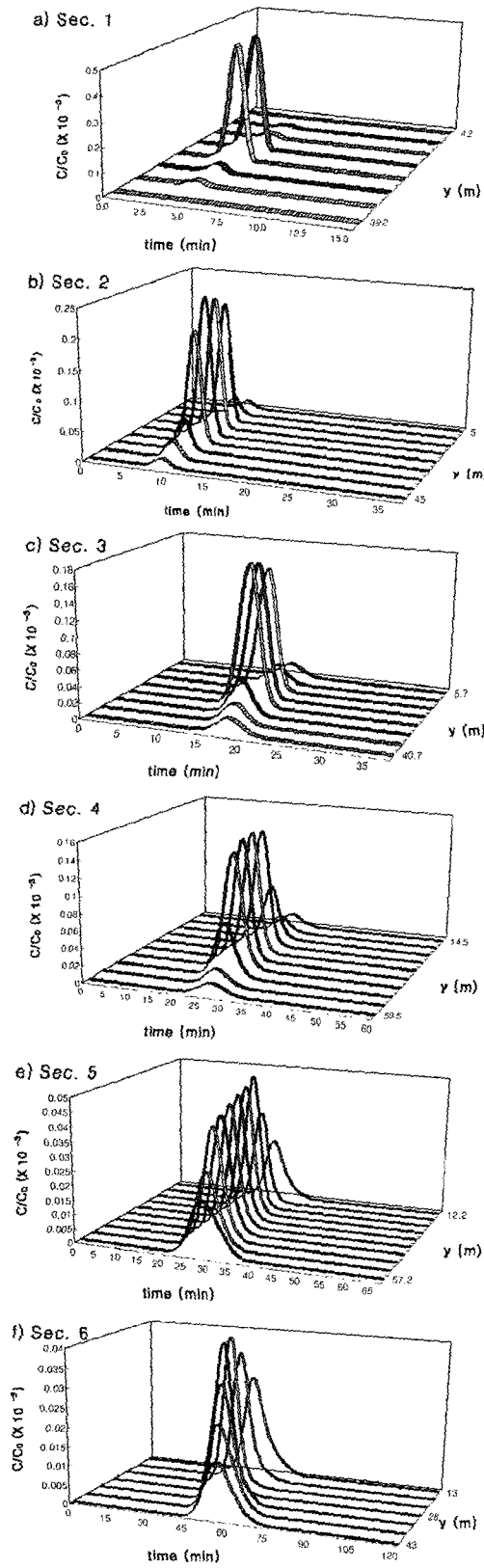
그림 8. 홍천강 유속의 모의치 및 실험치

만곡부인 측선 2, 3, 5의 경우 최대유속이 발생하는 좌안 (외측 제방)측에 근접하여 농도값이 크게 나타나는 것으로 밝혀졌다. RMA4에 의한 수치모의도 이러한 경향을 적절하게 재현하고 있다. 그림 10의 홍천강의 결과도 청미천의 경우와 유사하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

그림 9~10에 도시한 농도분포 곡선 비교에서 수치해의 정확성을 보다 정량적으로 파악하기 위해서 각 농도-시간 곡선에서 평균도달시간 ( $t_c$ )과 통계학적 분산 ( $\sigma_t^2$ )을 계산하여 그림 11~12에 도시하였다. 이 그림들에서  $t_c$ 에 대한 모의치는 실측치와 비교적 잘 일치하고 있으나,  $\sigma_t^2$ 에 대한 모의결과는 실측값에 비해 작게 나

타고 있음을 알 수 있다. 이는 수치모형이 추적자 오염원의 평균적인 이송 (advection) 과정은 정확하게 모의하고 있으나, 시간에 따라 농도곡선이 퍼진 정도는 제대로 모의하고 있지 못함을 의미하는 것이다. 이러한 현상은 특히 추적자의 주입지점에서 멀리 떨어진 측선 (측선 5, 6)의 경우에 극명하게 나타나고 있는데, 이는, 그림 9~10에서 볼 수 있듯이, 대상하천의 실험구간에 존재하는 소-여울 구조, 양안 만입 (side pocket), 불규칙성 등으로 인한 저장효과 때문에 오염물질이 일시 저장되었다가 다시 분류로 방출되는 과정에서 나타나는 농도-시간 곡선의 긴 꼬리에 의한 것으로 사료된다 (Fischer 등, 1979; Seo 와 Cheong, 2001).

# 모의결과



# 실험결과

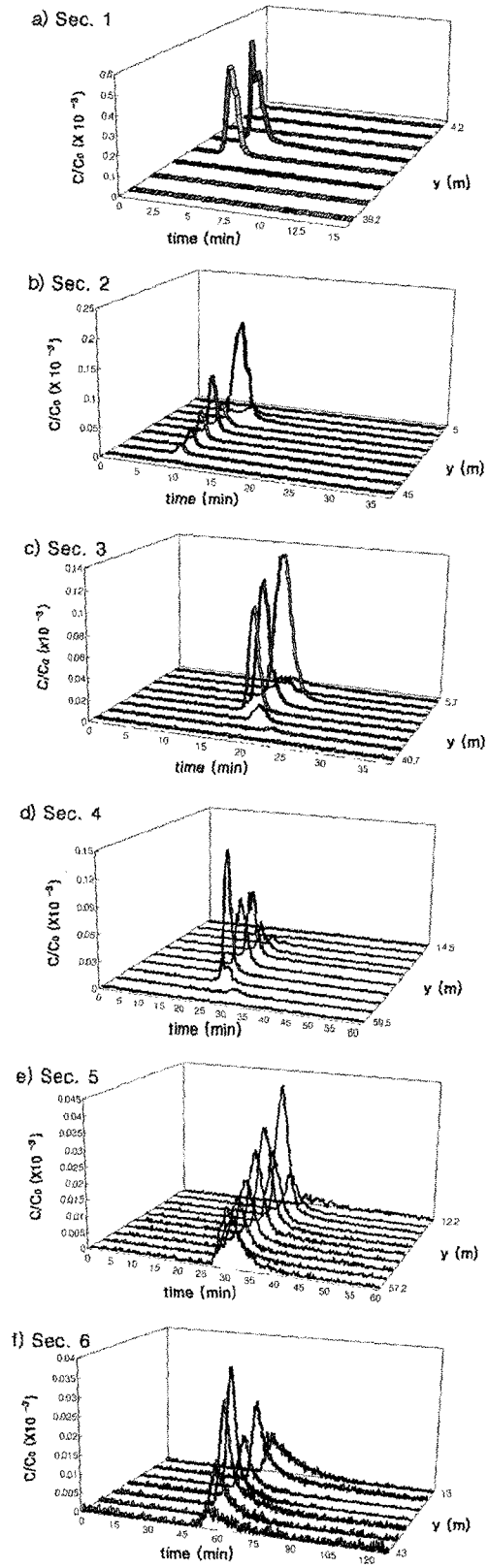


그림 9. 청미천의 추적자 농도분포 비교

모의결과

실험결과

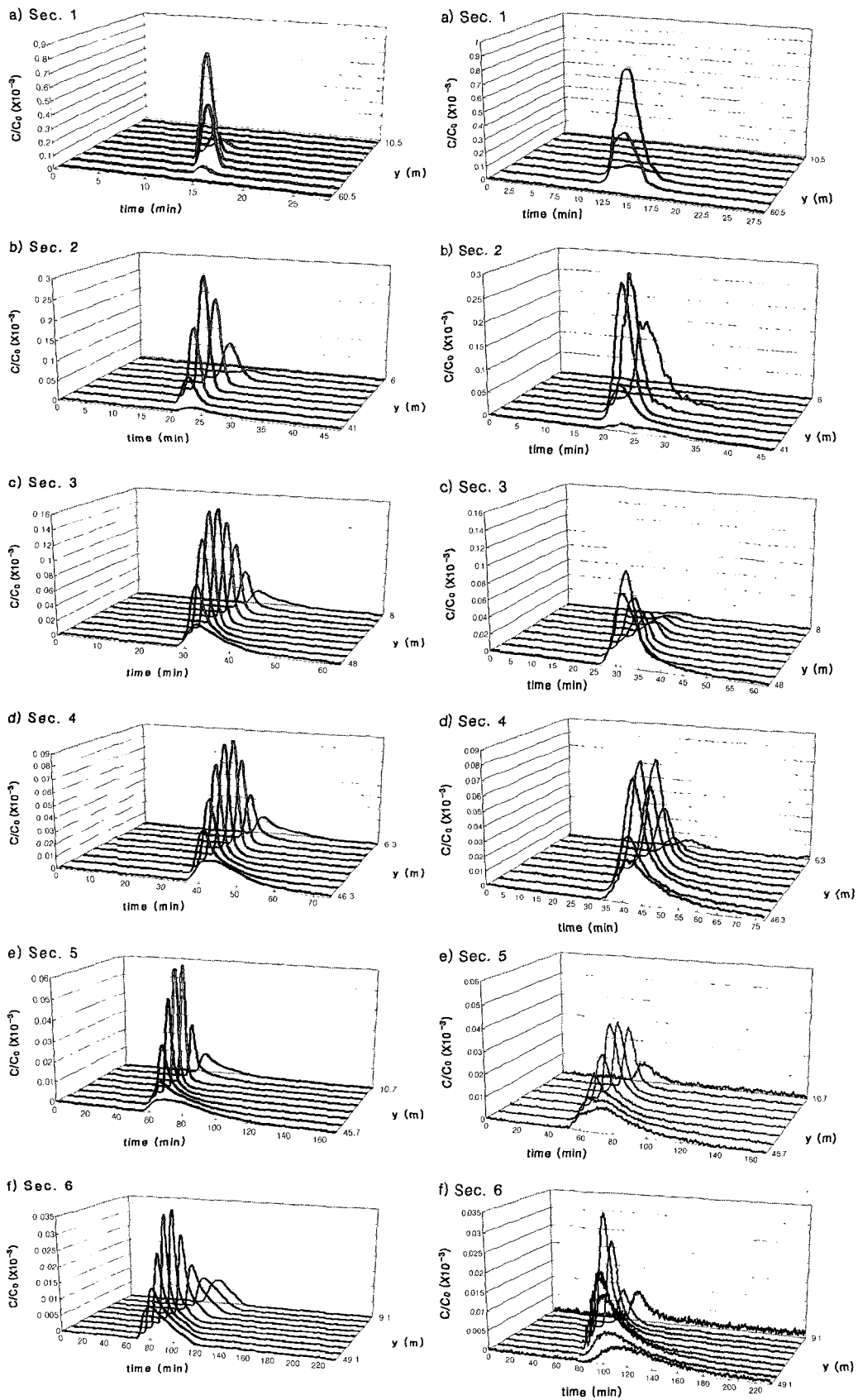


그림 10. 홍천강의 추적자 농도분포 비교

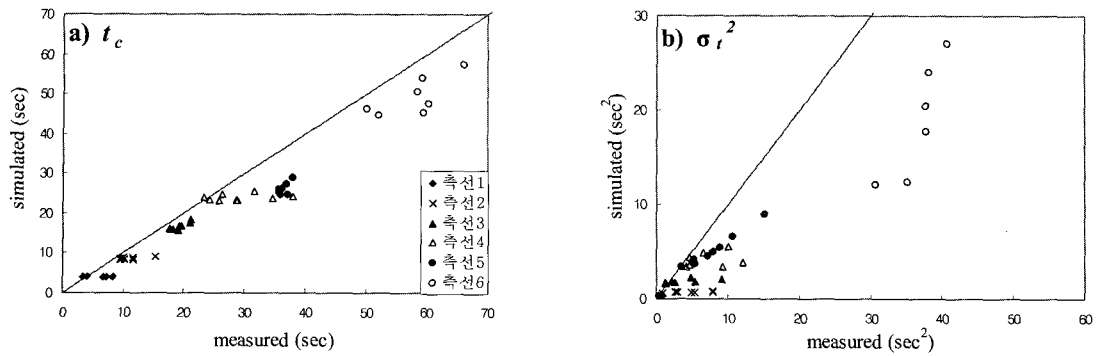


그림 11. 청미천에서 추적자 오염운의 평균도달시간 ( $t_c$ ) 및 분산 ( $\sigma_t^2$ )

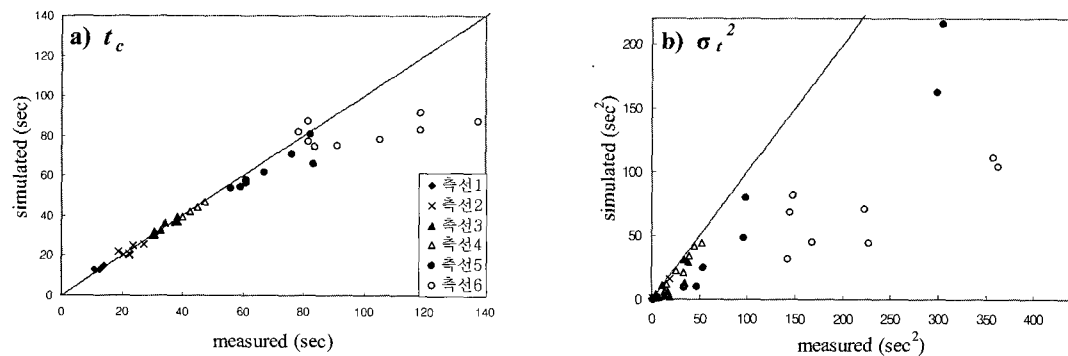


그림 12. 홍천강에서 추적자 오염운의 평균도달시간 ( $t_c$ ) 및 분산 ( $\sigma_t^2$ )

## 5. 결 론

본 연구에서는 사행이 발달한 자연 하천에서의 수리학적 흐름 특성과 오염물의 거동 특성을 파악하기 위하여 2차원 수치모형인 RMA2와 RMA4 모형을 이용하였다. 수치 모의결과를 실험 결과와 비교함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

수치모형을 교호사행이 존재하는 S자형 사행수로에서 측정된 물의 흐름 및 추적자 확산 자료를 이용하여 검증한 결과, RMA2 모형은 최대 유속선이 만곡부에서는 만곡의 내측 제방 치우쳐서 발생하고 직선부에서는 수로 중앙에서 발생함으로써 수로의 최단 거리를 통과하는 현상을 적절하게 모의하고 있는 것으로 밝혀졌다. 추적자의 농도장 해석에 있어서, RMA4 모형은 추적자 오염운이 최대유속선을 쫓아서 이동하는 현상과 첫 번째 만곡부를 지나면서 발생하는 오염운의 분리현상을 적절하게 모의하고 있음을 알 수 있었다.

2차원 RMA 모형의 실제 하천에 대한 적용성을 검토하기 위하여 청미천 및 홍천강에서 측정된 유속 및 농도 자료를 이용하였다. RMA2 모형에 의한 유속장 모의 결과, 수치모형은 청미천 및 홍천강의 만곡구간

에서 만곡의 외측 제방에 최대유속이 발생하는 현상을 비교적 잘 모의함을 알 수 있었다. 그러나 실제 하천에서 하상 및 하안의 3차원적 변화와 불규칙성에 의한 국부적인 유속 분포의 변화는 구체적으로 모의하지 못하는 것으로 나타났다. RMA4 모형에 의한 농도장 모의 결과, 수치모형은 농도-시간 곡선의 전반적인 경향을 적절하게 모의하고 있는데, 특히 만곡부에서 오염운이 최대유속이 발생하는 외측 제방 측에 근접하여 이동하는 현상을 잘 재현하고 있음이 밝혀졌다. 정량적인 분석을 위하여 농도 곡선의 평균도달시간과 통계학적 분산을 비교한 결과, 수치모형이 평균도달시간은 적절하게 모의하고 있으나 분산은 다소 과소 예측하고 있음이 밝혀졌는데, 이는 실제 하천의 실험 구간에 존재하는 다양한 형태의 불규칙성(소여울 구조, 양안 만입 등)에 의한 저장 효과로 인해 오염물질이 일시 저장되었다가 본류로 방출되는 과정에서 발생하는 농도-시간 곡선의 긴 꼬리에 기인한 것으로 판단된다. 본 연구에서 분산계수는 실측농도분포로부터 계산한 값을 미세 조정하여 사용하였으며, 이는 기존의 추정식에 의한 추정치와도 잘 부합하는 것으로 밝혀졌다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 21세기 프론티어 연구개발 사업인 수자원의 지속적 확보기술 개발 사업단(과제명: 하천 흐름 및 하상 변동 해석 기술 개발)의 연구비 지원과 서울대학교 공학연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고 문헌

- 박무중, 김중훈, 윤용남 (1994). "RMA - 4 에 의한 한강하류부에서의 오염물 확산이송 특성연구." **한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 89-92
- 서일원, 백경오, 전태명, 진준하 (2003). "사행하천에서 횡혼합에 관한 추적자 실험." **한국수자원학회 논문집**, Vol. 36, No. 4, pp. 673-689.
- 서일원, 성기훈, 백경오, 정성진 (2004). "사행수로에서 흐름특성에 관한 실험적 연구." **한국수자원학회 논문집**, Vol. 37, No. 7, pp. 527-540.
- Baek, K. O. (2004). "Transverse Mixing in Meandering Channels with Unsteady Pollutant Source." PhD thesis, Seoul National University, Korea.
- ECGL (1995). *Surface-water modeling system: Reference manual Version 5.0*. Brigham Young University.
- Elder, J. W. (1959). "The dispersion of marked fluid in turbulent shear flow." *J. Fluid Mech.* Vol. 5, No. 4, pp. 554-560.
- Fischer, H. B., List, E. J., Koh, R. C. Y., Imberger, J., and Brooks, N. H. (1979). Mixing in inland and

coastal waters. Academic Press, New York.

Gee, D.M. and Wilcox, D.B. (1985). "Use of a Two-Dimensional Flow Model to Quantify Aquatic Habitat." Proceedings of the American Society Civil Engineers Special Conference on Computer Applications in Water Resources, Buffalo, NY.

King, I.P., (1997). RMA2 version 64 User Manual.

King, I.P. and Norton, W.R. (1978). "Recent application of RMA's finite element models for two-dimensional hydrodynamics model and water quality." in *Finite Element in Water Resources*, Brebbia, C.A. et al. (eds.), Pentech Press, pp. 281-299.

Norton, W.R. (1980). EBMUD Hydrodynamic and water quality models for San Francisco Bay. Resources Management Associates, pp. 1-260.

Sayre, W.W. (1979). "Shore-attached thermal plumes in rivers." *Modelling in Rivers*, Wiley-interscience, London.

Seo, I. W. and Cheong, T. S. (2001). "Moment-Based Calculation of the Parameters for the Storage Zone Model for River Dispersion," *Journal of Hydraulic Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol. 127, No. 6, pp. 453-465.

WES (1996). Users guide to RMA-2 Version 4.3. USACE.

(논문번호:04-09/접수:2004.02.10/심사완료:2004.10.27)