



Development and application of automation algorithm for optimal parameter combination in two-dimensional flow analysis model

An, Sehyuck^a · Shin, Eun-taek^b · Song, Chang Geun^c · Park, Sungwon^{d*}

^aMaster's Student, Department of Safety Engineering, Incheon National University, Incheon, Korea

^bPh. D. Student, Department of Safety Engineering, Incheon National University, Incheon, Korea

^cProfessor, Department of Safety Engineering, Incheon National University, Incheon, Korea

^dLecturer, Department of Civil and Environmental Engineering, Incheon National University, Incheon, Korea

Paper number: 23-051

Received: 30 August 2023; Revised: 4 October 2023; Accepted: 4 October 2023

Abstract

Two-dimensional flow analysis, a fundamental component of hydrodynamics, plays a pivotal role in numerically simulating fluid behavior in rivers and waterways. This modeling approach heavily relies on parameters such as eddy viscosity and roughness coefficient to accurately represent flow characteristics. Therefore, combination of appropriate parameters is very important to accurately simulate flow characteristics. In this study, an automation algorithm was developed and applied to find the optimal combination of parameters. Previously, when applying a two-dimensional flow analysis model, former researchers usually depend on the empirical approach, which causes many difficulties in finding optimal variable values. Using the experimental data, we tracked errors according to the combination of various parameters and applied the algorithm that can determine the optimal combination of parameters with the Python language. The automation algorithm can easily determine the most accurate combination by comparing the flow velocity error values among the two-dimensional flow analysis results among the combinations of 121 (11×11) parameters. In the perspective of utilizing automation algorithm, there is an expected high utility in promptly and straightforwardly determining the optimal combination of parameters with the smallest error.

Keywords: Two-dimensional flow analysis, Eddy viscosity, Roughness coefficient, Automation algorithm, Optimal parameter combination

2차원 흐름해석모형의 매개변수 최적조합결정 자동화 알고리즘의 개발과 적용

안세혁^a · 신은택^b · 송창근^c · 박성원^{d*}

^a인천대학교 안전공학과 석사과정, ^b인천대학교 안전공학과 박사과정, ^c인천대학교 안전공학과 교수, ^d인천대학교 도시환경공학부 강의교수

요 지

천수방정식 기반 흐름해석모형은 하천 및 수로에서의 흐름을 수평 2차원적으로 수치모의하는데 활용되며 매개변수인 와점성계수와 조도계수에 큰 영향을 받는다. 따라서 적절한 매개변수의 선택은 흐름특성을 정확하게 모사하기 위해 매우 중요하다. 본 연구에서는 2차원 흐름해석에 적용되는 매개변수의 최적조합을 찾기 위한 자동화 알고리즘을 개발하고 적용하였다. 기존연구에서 2차원 흐름해석모형을 적용하는 경우 매개변수의 선정에 있어 경험적인 방법을 사용하여 최적의 매개변수를 찾는 데 어려움이 있었다. 따라서 본 연구에서는 실험결과를 활용하여 다양한 매개변수의 조합에 따른 오차를 추적하고, 매개변수의 최적조합을 결정할 수 있는 알고리즘을 Python 언어를 이용하여 개발하고 적용하였다. 자동화 알고리즘은 121(11×11)개의 매개변수 조합에 따른 2차원 흐름해석결과 중 유속모의결과와 오차값을 비교하여 가장 정확한 조합을 손쉽게 결정하도록 구성되었다. 오차가 가장 작은 매개변수의 최적조합을 자동화 알고리즘의 적용을 통해 신속하고 간단하게 결정할 수 있다는 측면에서 높은 활용 가치가 있을 것으로 기대된다.

핵심용어: 2차원 흐름해석, 조도계수, 와점성계수, 자동화 알고리즘, 매개변수 최적조합

*Corresponding Author. Tel: +82-32-835-8291
E-mail: billy1006@gmail.com (Park, Sungwon)

1. 서론

동수역학 수치해석모형은 자연 현상인 물의 흐름을 이해하고 예측하는 데에 중요한 정보를 제공하며 홍수 관리, 수리구조물 설계 등 다양한 분야에서 널리 사용된다. James and Wark (1992)은 하천의 효율적인 수송량 추정에 관한 연구를 진행하였는데, 이는 하천 공학 및 홍수관리 분야에서 매우 중요한 응용내용을 다루고 있으며, 하천 모델링 분야의 많은 연구에 영향을 주었다. Han *et al.* (2008)에 따르면 2차원 천수방정식 기반의 수치해석모형이 하천 및 수로의 흐름을 수치적으로 모사하는 방법으로, 수리학적 흐름거동을 해석하는데 적용된 바 있다. 또한 사행, 여울과 소 그리고 난류 분포 등에 의한 침식과 퇴적을 예측하는 데에도 활용된 바 있다(Seo and Song, 2010). 하천이나 수로에서의 흐름은 다양한 인자들에 의해 영향을 받는데 이 중에서도 가장 중요한 매개변수는 와점성계수(eddy viscosity)와 조도계수(roughness coefficient)이다(Seo and Song, 2010). 여기서 와점성계수는 유체의 점성 특성을 나타내며, 조도계수는 하천이나 수로하상의 거칠기를 의미한다. 또한 조도계수는 Manning 조도계수를 의미하며, 공식이나 수치해석모형의 거칠기 매개변수로 적용되는 매개변수로서, 하천 및 수로의 바닥면 거칠기를 의미한다. 또한 조도계수는 일반적으로 실제 지형 및 하천 특성에 따라 변화하며, 수자원 및 홍수 관리, 수로 설계 등 다양한 분야에서 중요한 역할을 한다. 이에 관한 연구는 과거 수십 년 동안 국내외에서 진행된 바 있으나 이 중에서도 Arcement and Schneider (1989)에 따르면 조도계수는 하천 및 수로 모델링에서 중요한 매개변수 중 하나로, 수문학 및 하천관리 분야에서 활발하게 활용된다고 밝혔고, Lee *et al.* (2012)은 실무활용을 위한 조도계수 관계식의 결정에 관한 연구를 수행하였다. 또한 주로 이용되고 있는 2차원 상용수리해석 모형(RMA-2)을 대상으로 매개변수의 민감도 분석을 한 연구들 중에서 Yim (2007)은 2차원 해석에 사용되는 모형의 매개변수는 조도계수, 와점성계수, 격자크기 순으로 민감도가 높다고 밝힌 바 있고, Bae *et al.* (2012)은 하천 흐름 모의 시 사용하는 매개변수의 영향에 대한 연구를 수행하였으며, 그 과정에서 조도계수, 와점성계수가 모의결과에 주는 영향을 비교하여 모의를 수행하였다. Kim *et al.* (2019)과 Park *et al.* (2018)는 HDM-2D의 주요 매개변수로 조도계수와 와점성계수를 강조했으며, 조도계수를 선택할 때 시행착오법을 통해 유속의 횡방향 분포를 가장 잘 나타내는 조도계수를 선택하였다. 이와 같이 천수방정식 기반의 수치해석모형의 매개변수들은 흐름분포에 직접적인 영향을 미치기 때문에 정확하고 적절한 매개변수 선택은 2차

원 흐름해석 결과의 정확도 확보에 필수적이다. 하지만 매개변수를 결정하거나 선택하는 방법은 주로 경험적인 공식이나 선행 연구에서 제안된 범위에 기반하여 수치해석모형의 정확도를 높이는데 한계가 있었다. 특히 적용가능한 범위 내의 매개변수의 수많은 조합을 고려하여 수치해석실험을 반복적으로 수행한 뒤 오차분석을 통해 정확도가 가장 높으면서 동시에 수리학적 이론을 만족하는 최적 조합을 찾는 방법은 많은 시간과 계산자원을 필요로 한다. 따라서 본 연구는 매개변수의 최적 조합을 신속하고 효율적으로 결정하기 위해 자동화 알고리즘을 개발하고 적용하는 데 주력하였다. 특히 실험과 수식화를 통해 매개변수 오차의 개선 경향을 시각화하고 추적하며, 초기 범위에서 매개변수의 최적 조합을 추정하기 위한 파이썬기반 알고리즘을 개발하고 검증하였다. 특히, 이 알고리즘은 2차원 흐름해석모형과 오차분석 기술을 하위 모듈로 결합하여 다양한 매개변수 조합 중에서 가장 정확한 조합을 쉽게 결정할 수 있도록 구축되었다.

2. 방법론

2.1 적용 수치 모형

HDM-2D (HydroDynamics Model-2D)는 수평 2차원 흐름해석을 수행하는 수치해석모형으로 천수방정식을 기반으로 개발되었으며 주로 하천 및 개수로 흐름을 수치적으로 모사하고 예측하는데 사용된다. HDM-2D는 와점성계수와 조도계수 등의 매개변수에 따른 유속과 수위를 예측할 수 있는 모형으로 질량보존방정식인 Eq. (1)과 운동량보존방정식인 Eq. (2)로 구성된다(Seo and Song, 2010).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -g \frac{\partial(H+h)}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - gn^2 \frac{u_i \sqrt{u_j u_j}}{h^{4/3}} \quad (2)$$

여기서, u_i 는 i 가 1인 경우 직교좌표계에서 수심평균된 흐름 방향 유속, i 가 2인 경우 수심평균된 폭방향 유속, g 는 중력가속도, H 와 h 는 기준선으로부터 하상까지의 거리와 수심, n 은 Manning의 조도계수를 의미하며 ν_{ij} 는 텐서 형태의 와점성계수를 나타낸다. 운동량방정식인 Eq. (2)에 포함된 조도계수와

와점성계수에 따라 점성항과 바닥마찰항의 크기가 결정되기 때문에 이 두 매개변수의 결정은 흐름해석모형의 결과에 큰 영향을 미친다.

2.2 매개변수 최적 조합 결정

본 연구에서 개발된 알고리즘은 Fig. 1과 같이 3가지 서브 모듈로 구성되어 있으며 초기 매개변수 범위 설정, 매개변수 탐색, 정확도 평가, 시각화, 매개변수의 최적조합 결정을 단계로 구성되어 있다. 먼저, 연구에서 사용할 매개변수의 초기범위를 설정한다. 이 초기범위는 매개변수 탐색 단계에서 고려한다. 다음으로 초기범위를 기반으로 알고리즘은 다양한 매개변수 조합을 탐색한다. 이때, 각각의 조합은 수치해석모형에 적용되어 모의결과를 생성한다. 본 연구에서는 각각 11가지의 조도계수와 와점성계수의 조합으로 총 121개의 조합을 테스트 하였다. 와점성계수는 $10^{-5} \leq \nu_{ij} \leq 10^{-2}$ 의 범위에서 10개의 값을 선택하였고, 조도계수는 $0.001 \leq n \leq 0.1$ 의 범위 내에서 약 0.01의 간격으로 10개로 선택하였다. 또한 기존연구(Seo and Song, 2010)와의 비교를 위해서 매개변수 조합($\nu=0.001$; $n=0.013$)을 추가하여 총 121개(11개×11개)의 조합으로 알고리즘을 적용하였다. 이후, 생성된 검증결과와 수치해석 결과를 비교하고, 이를 통해 각 매개변수 조합의 정확도를 평가하였다. 그리고 매개변수 조합과 관련된 검증결과 및 수치해석 결과를 Heat-map으로 시각화하여, 연구자 혹은 모형사용자가 이해하고 비교하기 쉽도록 표출한다. Heat-map은 데이터의 특정 영역에서 발생하는 패턴이나 경향성을 시각적으로 표현하는데 효과적인 도구로 데이터의 값들을 색상으로 나타내며 각각의 셀이나 픽셀이 데이터의 상대

적 크기나 강도를 나타낸다. 이러한 시각화 결과는 결과의 패턴을 빠르게 파악할 수 있도록 도와준다. 마지막으로 전체의 과정에서 얻은 정보들을 기반으로 알고리즘은 매개변수 최적 조합을 결정할 수 있다. 이 최적 조합은 연구 목표에 최적화된 결과를 제공한다.

초기 매개변수는 흐름해석모형의 입력값으로 사용되며, 적절한 초기 매개변수 설정은 최적 조합 탐색에 중요한 역할을 한다. 또한 오차분석을 통해 매개변수의 조합에 따른 정확도를 평가하였다. 본 연구에서는 여러 오차분석 기법 중에서 RMSE (Root Mean Square Error)와 P-bias (Percent-bias) 평가기법을 적용하였다(Chai and Draxler, 2014). RMSE와 P-bias를 본 알고리즘에 적용한 이유는 다음과 같다. RMSE는 예측값과 실측값 간의 차이를 측정하는 지표로, 모델의 예측 정확도를 측정하는 데 효과적이다. 이 오차는 실측값과 예측값 간의 사이를 제공하여 평균화한 후 제공근을 취한 값으로, 모델의 예측 성능을 수량화 하는데 널리 사용된다. RMSE는 제공 오차를 사용하기 때문에, 오차가 양수와 음수 모두 고려된다. 이는 모델의 과소 또는 과대 예측 모두를 평가할 수 있게 해주며, RMSE값이 낮아질수록 정확도가 높은 평가기법이다. 다음으로 P-bias는 실측값과 예측값 간의 비율적인 편향을 측정하는 지표로, 특히 환경, 기후 또는 물리적인 과정과 관련된 모델에서 유용하다. P-bias는 실측값과 예측값 간의 비율적인 차이를 나타내므로, 비율에 따른 편향을 고려하는 데 도움을 준다. 일부 연구나 응용에서는 결과의 비율적인 편향이 중요한데, 예를 들어 수자원 모델링이나 환경 모델링에서 비율적인 편향을 고려하는 것이 실제 상황을 더 정확하게 반영할 수 있다. P-bias는 비율적인 편향을 나타내는 지표로 값이 양

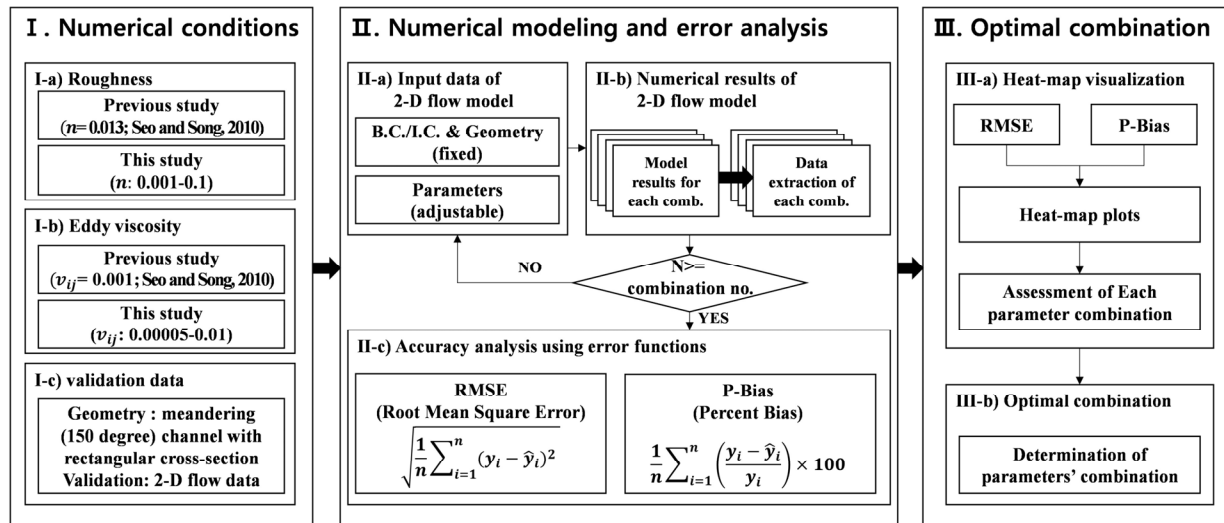


Fig. 1. Flow chart of the automation algorithm for optimal parameter combination

수와 음수로 표현되고, 0에 가까울수록 정확도가 높은 평가 방법이다. RMSE와 P-bias는 각각 예측 오차의 크기와 비울적인 편향을 나타내는 지표로, 이러한 다양한 측면에서 모델의 성능을 평가하고 개선하는데 도움을 준다. 두 지표를 함께 사용하면 모델의 예측 능력과 편향을 포괄적으로 평가할 수 있다. 따라서 두 지표를 개발한 알고리즘에 적용하여 성능을 평가하였다. 적용된 오차분석 기법은 아래 Eqs. (3) and (4)와 같다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2} \tag{3}$$

$$P - bias = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right) \times 100 \tag{4}$$

여기서, N 은 분석에 이용된 자료의 개수, y_i 는 예측값에 해당하는 수치해석 결과, \hat{y}_i 은 검증을 위한 실험측정값을 의미한다. 또한 매개변수의 최적조합을 결정하기 위해서 기존 연구 중 가장 대표적으로 알려져 있는 Manning의 조도계수를 이용

하였다(Chow, 1959; Engelund, 1966; Limerinos, 1970). 또한 외점성계수는 기존 연구(Seo and Song, 2010)에서 사용된 값을 기준으로 적절한 상하한 편차를 확보하여 매개변수 조합 설정에 활용하였다.

2.3 사행 실험수로 데이터

본 연구에서 개발된 2차원 흐름해석모형의 매개변수 최적 조합 결정 자동화 알고리즘의 검증을 위해서 실험실 사행수로 지형과 실측자료를 사용하였다. 사행특성은 자연하천의 대표적인 지형적 특성 중 하나이며 특히 만곡부를 지나면서 유속과 수위의 폭방향 편차가 극심하게 나타나기 때문에 2차원 흐름 해석모형의 검증에 널리 활용되고 있다. James and Wark (1992)과 Arcement and Schneider (1989)는 사행도에 따른 조도계수의 변화에 대한 내용을 다루었는데, 본 연구에서 다루는 실험실 사행수로는 직사각형 단면의 매끈한 철재 재질로 폭은 1 m로 균일하며 중심각과 사행도는 각각 150°와 1.52이고 두 개의 만곡부를 갖고 있다(Fig. 2). 취득된 유속결과는 12개의 단면에 대하여 micro-ADV (Acoustic Doppler Velocimeter)

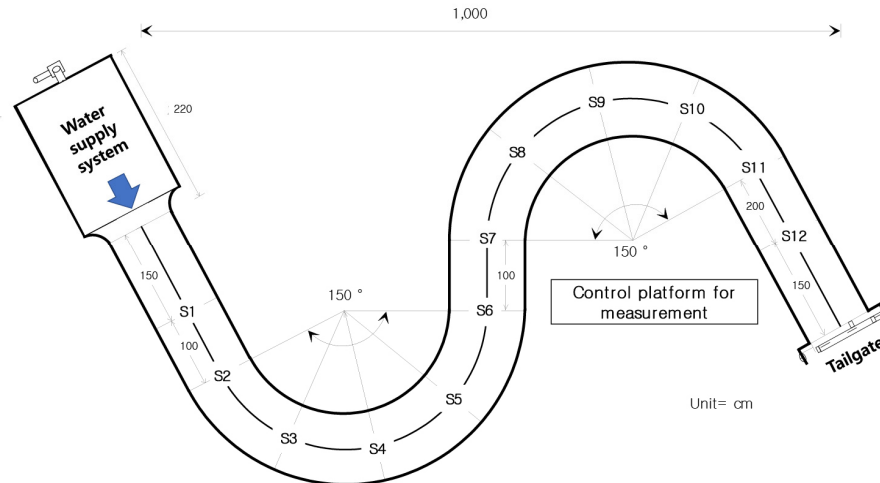


Fig. 2. Plan view of application channel

Table 1. Measured velocity data (unit: m)

Transverse distance from left bank (m)	0.075	0.118	0.165	0.212	0.259	0.306	0.354	0.401	0.448
S4	0.210	0.223	0.227	0.224	0.218	0.211	0.209	0.201	0.191
S9	0.158	0.158	0.166	0.165	0.172	0.173	0.180	0.179	0.193
Transverse distance from left bank (m)	0.495	0.542	0.590	0.637	0.684	0.731	0.778	0.826	0.873
S4	0.186	0.185	0.178	0.175	0.173	0.175	0.172	0.169	0.170
S9	0.199	0.199	0.204	0.212	0.218	0.229	0.240	0.248	0.249

로 측정되었고 3차원 유속데이터를 시간 및 수심평균하여 검증자료로 구성하였다. HDM-2D를 적용하기 위해 계산격자는 폭방향으로 0.020 m~0.047 m, 흐름방향으로는 0.074 m~0.123 m 크기의 사각망으로 3898개로 구성하였으며 경계조건은 실험조건(상류부 유입유량: 0.060 m³/s; 하류부 수위조건: 0.30 m)과 동일하게 설정하였다. 전술한 바와 같이 만곡부에서는 폭방향 유속편차가 크게 발생하기 때문에 자동화 알고리즘의 성능검증을 위해서 12개 유속측정 단면 중에서 폭방향 유속편차가 가장 크게 발생하는 만곡부 정점인 S4 단면과 S9 단면의 유속자료를 이용하였으며 Table 1에 정리하였다.

3. 연구 결과

3.1 매개변수의 최적조합 결정

매개변수의 최적조합을 결정하기 위해 개발한 자동화 알

고리즘을 통해 반복모의를 수행하였다. 이를 통해 다양한 매개변수 조합에 대한 흐름해석 결과를 얻을 수 있었다. 각 매개변수 조합에 대한 유속모의값의 정확도를 평가 및 비교하여 가장 정확도가 높은 매개변수 조합을 결정하였다. 각 매개변수 조합에 대한 오차 분포를 평가하고 매개변수 조합의 정확도를 시각적으로 비교하기 위하여 Heat-map을 사용하였다. 본 연구에서의 Heat-map은 매개변수 조합을 행(ν)과 열(n)로 나타내고, 각 조합에 대한 RMSE 값과 P-bias 값을 각각의 셀에 도시하였다. 이를 통해 최적 매개변수 조합을 쉽게 식별하고, 오차 분포를 비교할 수 있다.

Fig. 3의 실선 박스는 Seo and Song (2010)에서 적용했던 매개변수 조합의 오차분석결과로, 이를 본 연구의 적용결과와 함께 도시하여 비교하였다. Figs. 3(a) and 3(b)에는 S4 단면과 S9 단면에 대한 RMSE 분석결과를 각각 도시하였고, Figs. 3(c) and 3(d)에는 P-bias 결과를 두 만곡부 정점 단면에 대해

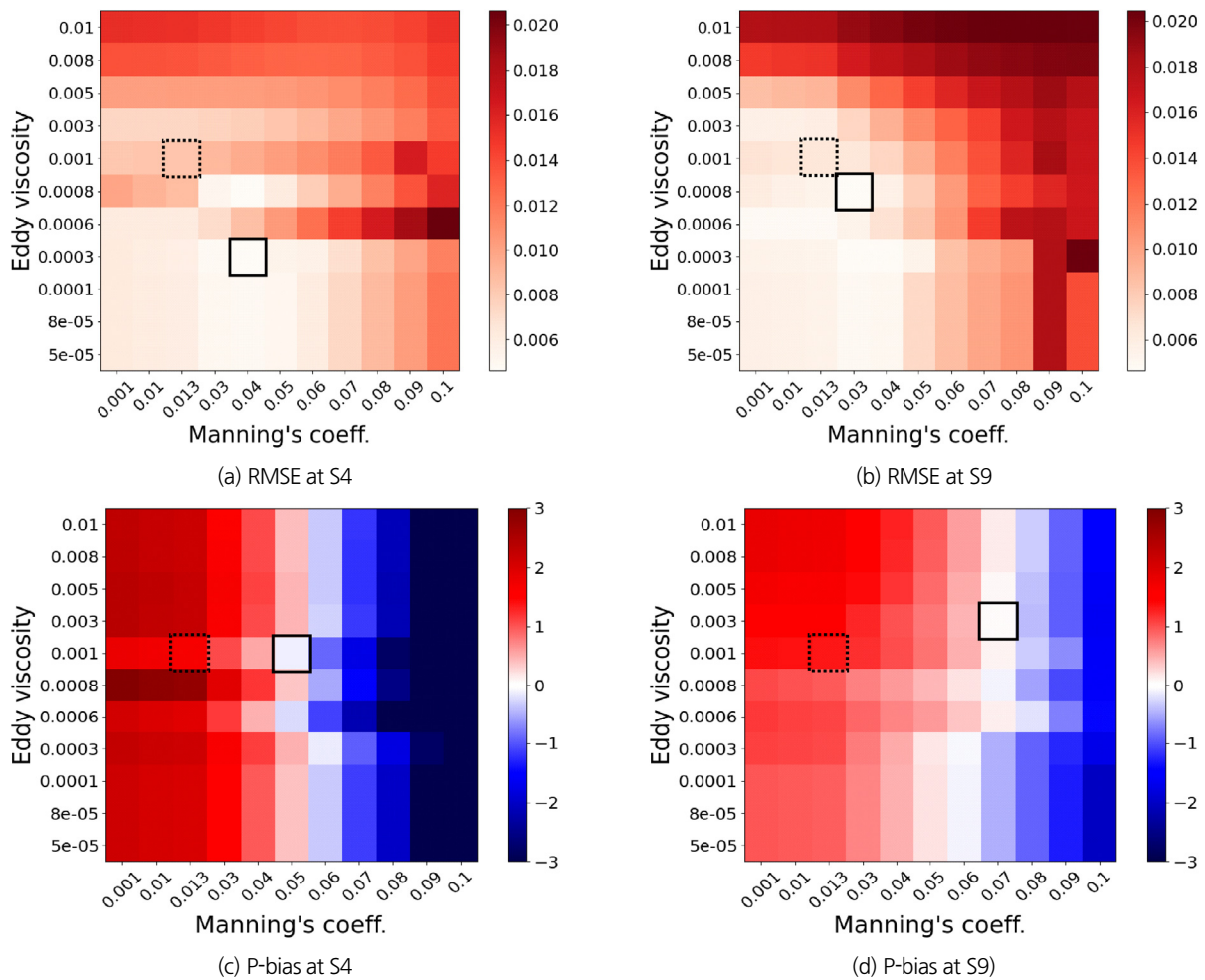


Fig. 3. Heat-map for each parameter combination (solid line box: this study; dashed line box: Seo and Song (2010))

각각 도시하였다. 먼저 RMSE 결과를 통해서 조도계수는 선행연구와 비교하였을 때, 상대적으로 큰 값인 0.03~0.04 수준으로 결정하는 조합이 정확도가 높음을 확인하였으며 외점성계수는 0.003~0.008 정도 수준으로 상대적으로 작은 값으로 결정하는 것이 정확도가 높게 나타나는 것을 확인하였다. P-bias 분석결과에서 특히 주목할 만한 점은 두 개의 만곡부 정점에 해당하는 단면 모두 약 0.05~0.07 수준의 조도계수를 이용하여 모의하는 것이 가장 낮은 P-bias 값을 나타냄을 확인하였으며, 이 범위보다 낮게 결정할수록 모의결과가 과소산정되고 이 범위보다 높게 결정할수록 모의결과가 과대산정되는 결과를 도출하였었다. 여기서, 기존 문헌이 제시한 범위와는 다소 차이가 있는 조도계수의 적용결과가 더 정확한 결과를 모의하게 된 이유는 우선 조도계수는 수로의 거칠기를 간접적으로 나타내는 매개변수이며 따라서 실제 적용대상의 모든 세부사항이나 물리적인 의미를 일괄적으로 표현하는데는 다소 한계가 있다는 점이며, 또한 적용대상이 특별하게 복잡하지 않은 지형일수록 조도계수 등의 매개변수값에 모의결과가 의존적이기 때문이다.

두 개의 만곡부 정점에서의 정량적인 오차분석 비교결과를 Table 2에 정리하였다. 사행수로의 첫 번째 만곡부 정점인 S4지점에서의 RMSE 값은 Seo and Song (2010)의 결과와 비교할 때 RMSE 값이 0.01173 에서 0.00461 로 60.7% 감소되었

고, 그리고 두 번째 만곡부 정점인 S9 지점에서는 RMSE값이 0.00947 에서 0.00463 으로 51.1% 감소되었다. 또한 P-bias 오차분석결과 S4 단면과 S9 단면에서 각각 -5.12% 에서 -0.14% 로 97.3%, 2.02%에서 0.056% 로 97.2% 감소되어 기존 연구의 매개변수 조합 대비 오차가 크게 개선되었다.

3.2 기존 연구결과와 비교

2차원 흐름해석 시 사용하는 매개변수는 주로 경험적인 접근이나 기존 연구자료에 의존하여 설정했던 경우가 많았으나, 이러한 방식은 연구자의 주관적인 판단에 따라 결정되기 때문에 결과의 일관성과 신뢰성, 재현성, 반복가능성에서 많은 한계를 보였다. Fig. 4에는 기존 연구(Seo and Song, 2010)에서 수행된 모의결과와 본 연구에서 결정한 매개변수의 최적 조합 적용결과를 도시하였다.

그 결과 기존연구와 동일하게 두 개의 만곡부 정점의 내측에서 최대유속이 발생하는 특성을 나타냈다. 본래 만곡부 외측에서 편수심이 발생하며 최대유속이 발생하는 것이 물리적인 현상이나, Seo *et al.* (2006)은 사행수로의 흐름구조 및 난류 특성에 관한 연구를 진행하였고, 해당 연구에서 모의결과와 흐름 양상이 자연하천의 양상과 다르게 나타나는 이유는 단면 형상이 직사각형인 고정상이기 때문이라고 밝힌 바 있다. 또

Table 2. Comparison of error analysis

Section		Parameters		Error analysis	
		Roughness coefficient	Eddy viscosity	RMSE (m/s)	P-bias (%)
Previous study (Seo and Song, 2010)	S4	0.013	0.001	0.01173	-5.12
	S9			0.00947	2.02
This study	RMSE	S4	0.0003	0.00461	1.126
		S9	0.0008	0.00463	0.735
	P-bias	S4	0.0010	0.01020	-0.140
		S9	0.0030	0.01433	0.056

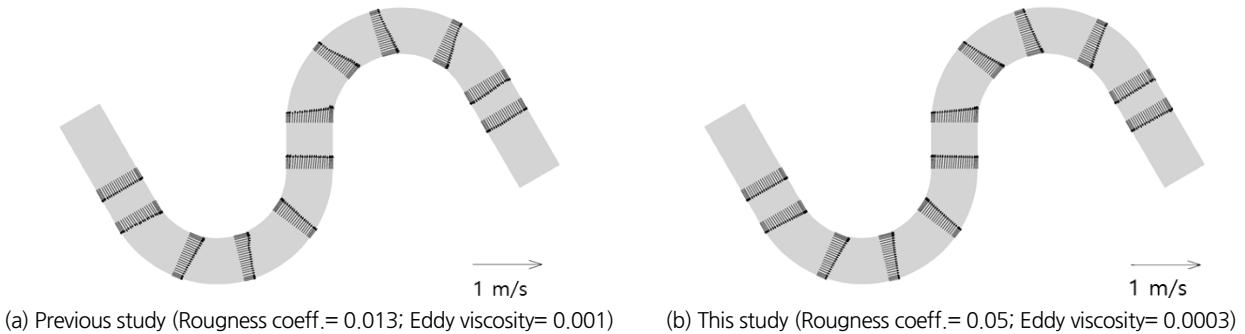


Fig. 4. Comparison of two-dimensional flow distribution

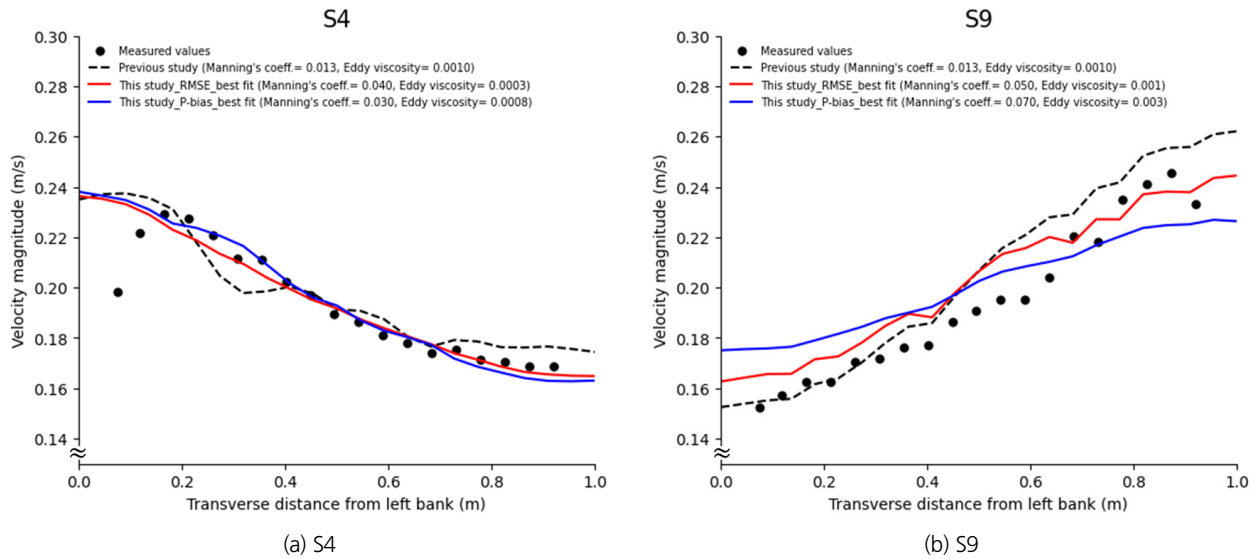


Fig. 5. Comparison of velocity magnitude in two meander apexes

한 만곡부에서 발생하는 편수위 때문에 내측의 속도수두가 외측의 그것에 비해 크므로, 바닥 및 벽면마찰로 인한 손실수두를 무시한다면 내측에 최대유속이 발생한다고 알려진바 있다(Henderson, 1966).

흐름 특성을 보다 명확하게 분석하기 위해서 Fig. 5에서는 S4와 S9 두 개의 만곡부 정점에서의 폭방향 유속을 비교하였다. 그 결과 기존 연구(Seo and Song, 2010)에서 적용한 조합($n=0.013$, $\nu=0.001$)에 의한 결과보다 본 연구에서 적용한 매개변수 최적 조합에 의한 결과(RMSE-S4: $n=0.040$, $\nu=0.0003$, RMSE-S9: $n=0.050$, $\nu=0.001$, P-bias-S4: $n=0.030$, $\nu=0.0008$, P-bias-S9: $n=0.070$, $\nu=0.003$)가 실험 측정값에 더 가까운 것으로 분석하였다. 특히 만곡부 정점에서 발생하는 유속편차의 발달을 보다 적절하게 모의할 수 있는 매개변수의 최적조합을 수동적으로 오랜 시간 동안 찾지 않고 자동화 알고리즘의 적용을 통해서 손쉽게 결정할 수 있다는 측면에서 높은 활용가치가 있다.

4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 천수방정식 기반의 2차원 흐름해석모형인 HDM-2D의 주요 매개변수인 와점성계수와 조도계수를 효율적으로 결정할 수 있는 자동화 알고리즘을 개발하고 검증하였다. 개발된 알고리즘의 검증을 위해서 실험실 사행수로의 유속자료를 사용하였고, 와점성계수 11개와 조도계수 11개의 총 121개의 조합을 두 개의 오차분석기법인 RMSE와 P-bias 기법을 사용하여 기존 연구에서 사용한 매개변수 조합

과 비교하였다. RMSE를 이용하여 분석한 경우 본 연구 방법론에 의해 RMSE값을 S4지점에서는 60.7%, S9지점에서는 51.11%만큼 저감시킬 수 있었고 P-bias를 이용하여 분석한 경우 S4지점에서는 97.26%, S9지점에서는 97.23%만큼 감소시킬 수 있는 매개변수 최적조합을 결정할 수 있었다. 또한 P-bias 오차분석결과를 이용하여 수치해석모형이 유속 측정값을 과소 및 과대 산정하는 조도계수(0.05~0.07)의 범위를 찾을 수 있었다.

본 연구에서 제안한 매개변수 최적조합 결정 방법론을 적용하는 경우 기존 대부분의 연구에서는 모의영역에 일괄적으로 동일한 매개변수를 적용하는 2차원 흐름해석 방식의 한계점을 극복할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 알고리즘을 모의대상 영역에 대하여 국부적으로 각각 다른 값을 도출할 수 있는 장점을 고도화하여 더 실험결과 및 현장계측자료와 비교하는 연구를 지속할 예정이다. 특히 실제 하천지형에 적용하는 경우에 현장계측 측선 간격별로 각각 다른 매개변수를 지정하여 모의 결과의 정확도를 높일 수 있는 방법을 확장할 수 있다. 또한 유속자료 이외에 수위자료도 함께 정확도 분석 시에 활용하여 알고리즘 적용성을 더욱 크게 증대시킬 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 기후위기대응 홍수방어능력 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(2022003470001).

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Arcement, G.J., and Schneider, V.R. (1989). *Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains*. US Government Printing Office, Vol. 2339, Washington, DC, U.S.
- Bae, J.S., Shin, C.H., Lee, J.C., and Yoon, S.B. (2012). "Analysis of effect of roughness coefficient on numerical simulation for stream flow." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 12, No. 2, pp. 151-158.
- Chai, T., and Draxler, R.R. (2014). "Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? - Arguments against avoiding RMSE in the literature." *Geoscientific Model Development*, Vol. 7, No. 3, pp. 1247-1250.
- Chow, V.T. (1959). *Open-channel hydraulics*, McGraw-Hill, New York, NY, U.S.
- Engelund, F. (1966). "Hydraulic resistance of alluvial streams." *Journal of the Hydraulics Division*, Vol. 92, No. 2, pp. 315-326.
- Han, S.D., Choi, H., Ahn, C.H., and Lee, Y. (2008). "Analysis of hydraulic characteristics in the middle reaches of Nak-Dong River using 2-Dimensional numerical analysis model." *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*, KWRA, pp. 1732-1736.
- Henderson, F.M. (1966). *Open Channel flow*, Macmillan Publishing Co., New York, NY, U.S.
- James, C.S., and Wark, J.B. (1992). *Conveyance estimation for meandering channels*. Rep. SR 329, HR Wallingford, Oxford, U.K.
- Kim, H.S., Park, I.H., Sung, H.J., and Lee, D.S. (2019). *Development of particle dispersion model for enhancement of water pollution accident analysis results*. Korea Institute of Construction Technology Major Business Report, KICT 2019-102, Korea Institute of Construction Technology.
- Lee, J.S., Oh, G.E., Park, Y.J., and Jung, J.H. (2012). "Determination of relationships for manning roughness coefficient using hydraulic engineering field." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 12, No. 1, pp. 167-177.
- Limerinos, J.T. (1970). *Determination of the manning coefficient from measured bed roughness in natural channels*, US Government Printing Office, No. 1898, Washington, DC, U.S.
- Park, I.H., Kim, H.S., and Sung, H.J. (2018). *Development of particle dispersion model for enhancement of water pollution accident analysis results*. Korea Institute of Construction Technology Major Business Report, KICT 2018-116, Republic of Korea.
- Seo, I.W., and Song, C.G. (2010). "Development of 2D finite element model for the analysis of shallow water flow." *Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, Vol. 30, No. 2, pp. 199-209.
- Seo, I.W., Lee, K.W., and Baek, K.O. (2006). "Flow structure and turbulence characteristics in meandering channel." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers B*, Vol. 26, No. 5, pp. 469-479.
- Yim, D.H. (2007). *Analysis of the sensitivity of the two-dimensional analysis model parameter for the flow analysis of the river confluence flow analysis*. Master Thesis, Kyungil University.