Ecology and Resilient Infrastructure (2023) 10(4): 125-134
https://doi.org/10.17820/eri.2023.10.4.125

http://www.kseie.or.kr/
Online ISSN: 2288-8527

ORIGINAL ARTICLE

Py_STPS모형과 관측자료를 활용한 탁도역추적기법 개발

Development of Turbidity Backward Tracking Scheme Using Py_STPS Model and Monitoring Data

여홍구[1] · 이남주[2]*

[1]한국건설기술연구원 수자원하천연구본부 선임연구위원, [2]경성대학교 토목공학과 교수

Hong Koo Yeo[1] and Namjoo Lee[2]*

[1]Senior Research Fellow, Dept. of Hydro Science & Engineering Research, Korea Institute of Civll Engineering and Building Technology, Goyang 10223, Korea
[2]Professor, Dept. of Civil Eng., Kyungsung University, Busan 48434, Korea

Received 20 November 2023, revised 29 November 2023, accepted 29 November 2023, published online 31 December 2023

ABSTRACT: In order to develop a backtracking technique for turbidity measurement data without discriminatory characteristics, three turbidity backtracking techniques for predicting inflow turbidity of a stream were compared using real-time turbidity data measured at automatic water quality measurement points located upstream and downstream of the stream and the Py_STPS model. Three turbidity backtracking techniques were applied: 1) simple preservation method of turbidity load considering flow time, 2) a method of using the flow rate at the upstream boundary considering the flow time as the flow rate at the downstream boundary, 3) method of introducing internal reaction rate to reflect the behavior characteristics of turbidity-causing substances. As a result of applying the three backtracking models, it was confirmed that the backtracking technique that introduced the internal reaction rate had the best results.

KEYWORDS: Backtracking technique, Internal reaction rate, Py_STPS model, Turbidity load, Turbidity

요 약: 차별적 특징을 갖지 않는 탁도 측정자료에 대한 역추적기법을 개발하고자 지천의 상류와 하류에 위치한 수질자동측정점에서 측정된 실시간 탁도자료와 Py_STPS모형을 사용하여 지천의 유입탁도를 예측하는 세 가지 탁도역추적기법을 비교하였다. 유하시간을 고려한 탁도부하량 단순보존 방법, 유하시간을 고려한 상류경계의 유량을 하류경계의 유량으로 사용하는 방법, 탁도 유발물질의 거동특성을 반영하기 위해 내부반응률을 도입한 방법 세 가지 탁도 역추적기법을 적용하였다. 세 가지 역추적모형의 적용 결과, 내부반응률을 도입한 역추적기법의 결과가 가장 우수함을 확인할 수 있었다.

핵심어: 역추적기법, 내부반응률, Py_STPS모형, 탁도부하량, 탁도

1. 서 론

탁도는 물의 흐린 정도를 정량적으로 나타낸 지표이다. 탁도는 빛이 수중의 부유물질과 용존 유기물질 등에 의해 흡수되고 산란되는 정도를 측정하여, 부유물질의 양을 간접적으로 추정하는 광학적 방법이다. 물환경정보시스템의 수질자동관측망에서 제공되고 있는 탁도 자료는 지점자료로, 불연속성으로 인해 단순 선형분석이 불가능하여 이송-확산에 대한 전문적인 해석기법이 요구되며, 실측자료와의 검증이 이루어져야 한다.

***Corresponding author:** njlee@ks.ac.kr, ORCID 0000-0003-1599-846X

ⓒ Korean Society of Ecology and Infrastructure Engineering. All rights reserved.
This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

국가 수리수문/수질 관측자료와 연계하여 활용도를 분석하기 위해서는, 수집한 수리수문/수질 측정자료를 활용한 대상 하천의 탁도 이송확산 모의 결과가 요구된다 (Lee and Kim 2023).

역추적기법은 측정자료를 기반으로 수학적 모형을 사용하여 발생원의 위치와 발생량을 추정하는 기법으로, 다양한 분야에 적용되고 있다. 역추적기술은 인터넷 사용이 일상화됨에 따라 정보보호분야에서도 중요한 기술이 되었다. Kim and Choi (2005)는 기존 인터넷 네트워크체계에서 실시간 역추적기술의 동향과 적용사례를 분석하였고, 사이버범죄수사시 용의자를 추적할 수 있는 다양한 추적수단과 범죄발생원 관리가 가능할 것이라 기술하였다. 또한 Kim et al. (2014)은 사이버보안공격 등이 발생했을 경우 실제적인 공격근원지 정보 역추적을 위하여 관련 추적기술의 분류, 연구동향, 향후전망 등을 기술하였다.

대기오염원의 기원을 수학적으로 찾는 분산모델은 오래 전부터 사용되었다. 대기유동은 복잡한 시스템이어서 단순화된 수학모델을 사용하여 왔으며, 지속적인 모형 개선에도 불구하고 정확도 확보에는 아직 어려움이 있는 상황이다 (Lee et al. 2007). 따라서 대기 중 오염물질의 오염원을 확인하고 정량적으로 평가할 수 있는 대안으로 수용모델 (receptor model)이 사용되며, 수용모델링은 수용체에서의 화학적 특성 자료를 바탕으로 미세분진의 오염원을 평가하는 방법이다 (Hopke et al. 2003). Ashbaugh와 Malm이 개발한 PSCF (potential source contribution function)모형은 대기오염원의 장거리 추적평가에 자주 사용되는 고차원 수용모델링 중 하나이다 (Lupu and Maenhaut 2002). 최근의 대기오염원 역추적기술에 대한 국내 연구로는 대기오염물질의 이동경로상 물리화학적 변화 추적을 위한 Backward-tracking Model Analyzer 방법론 (Bae et al. 2017), 수용모델을 이용한 광양만권 주거지역 대기 중 초미세먼지 발생원 기여도 평가 (Park et al. 2022) 등이 있다.

하천수계에서 적용된 연구로서, NIER (2012)은 제련시설별의 납 동위원소의 유입 및 배출특성을 분석한 결과를 사용하여 안동호 퇴적물에 대한 오염원 특성을 분석하였으며, 정상상태의 바이너리모형 (binary model)을 사용하여 오염원 기여도를 추정하였다. 오염물질 유출사고를 대비한 오염물질의 유출지점과 유출량을 예측하는 기술개발과 관련하여, Kwon et al. (2019)은 공간적 분포에 따른 시간-농도곡선 (BTC)을 생성하고 이를 모멘트법과 멱함수회귀를 통한 BTC의 특징을 추출한 후, 기계학습 모형에 학습시켜 유출 지점과 유출량을 예측하는 오염물질 발생원 역추적모형을 개발하였다.

역추적기법에 대한 기존의 연구는 대부분 발생원별로 물질 자체 또는 물질의 성분이 다른 차별적 특징을 갖는 정보성분, 화학성분, 방사능성분 등을 갖는 경우에 대한 역추적기술에 해당한다. 이 연구에서는 차별적 특징을 갖지 않는 측정자료에 대한 역추적기법을 개발하고자 하였다. 하천 수환경 분야의 역추적기법은 측정된 자료를 기반으로 동역학적 모형을 사용하여 발생원의 위치와 발생량을 추정하는 기법이다. 낙동강의 제1지류에 위치한 수질자동관측소의 탁도 자료가 제한적이기 때문에, 본류의 실시간 탁도 자료를 사용하여 지류에서 유입되는 탁도를 역추적하는 모형 개발이 필요하다. 유입 지천의 상류와 하류에 위치한 수질자동측정점에서 측정된 실시간 탁도자료와 Py_STPS모형을 사용하여 지천의 유입탁도를 예측하는 탁도역추적기법을 개발할 목적으로 연구를 수행하였다. Py_STPS모형 (Lee and Kim 2023)은 FORTRAN버전의 STPS모형 (Lee and Heo 2007)의 Python 버전이다.

2. 연구 방법

2.1 Py_STPS 모형의 기본 이론

2.2.1 Py_STPS 모형의 지배방정식

하천과 같은 일차원 수로에서 Fig. 1과 같은 길이의 미분요소에 탁도 유발물질에 대한 질량보존법칙을 적용하면 다음과 같다 (Lee and Heo 2007).

$$d\mathbf{V}\frac{\partial c}{\partial t} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} + \dot{m}_{tr} + R \qquad \text{(Eq. 1)}$$

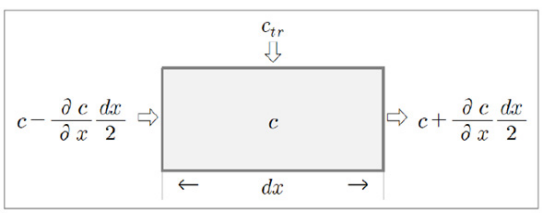


Fig. 1. Concept of one dimensional advection-dispersion equation (Lee and Kim 2023).

여기서, $d\mathbf{V}$는 미분요소의 체적, c는 탁도 유발물질의 농도, $\dot{m}(=cQ)$은 단위시간당 대상물질의 유출입 질량 (contaminant mass flowrates), R은 수표면 유입, 하상 유출입, 내부 물질반응 등 단위시간당 대상물질의 변화항, 아래첨자 *in*, *out*, *tr*은 각각 유입경계, 유출경계, 지천을 의미한다.

Eq. 1의 유출입 질량유속과 단위시간당 대상물질의 변화항에 대한 표현을 다시 정리하면 Py_STPS 모형의 지배방정식은 다음과 같다 (Lee et al. 2021).

$$\frac{\partial c}{\partial t}+\frac{\partial (Vc)}{\partial x}=E\frac{\partial^2 c}{\partial x^2}-\frac{(Q_{tr}c_{tr}+rc+p+s)}{Adx} \quad \text{(Eq. 2)}$$

여기서, V는 단면평균유속, E는 확산계수, A는 통수단면적, Q_{tr}은 지천 유입유량, c_{tr}은 지천 유입농도, r은 1차 반응에 의한 증감율, p는 하상 유출입량, s는 하상 유출입으로 인한 생성소멸량이다.

2.2 역추적모형의 지배방정식 구성

탁도 역추적모형의 지배방정식은 부정류 탁도 유동해석모형 (Py_STPS)의 지배방정식과 동일한 방정식을 사용할 수 있다. 탁도 역추적모형의 유한차분기법은 동일하게 적용할 수 있지만, Table 1과 같이 미지수와 입력자료가 달라진다.

역추적 문제 해결을 위해서는 다양한 동수역학적 접근방법과 경험적 접근방법의 특성을 검토하여 부정류 탁도유동해석에 적합한 역추적모형을 개발할 수 있지만, 이 연구에서는 단순한 형태로 이송항만을 고려하는 비정상 (time-variant) 물질보존방정식을 적용하였다.

Fig. 2에서 지천 합류점에서 완전혼합된 탁도부하량은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$c_1(t)Q_1(t)+c_2(t)Q_2(t) \quad \text{(Eq. 3)}$$

여기서, $c_1(t)$와 $Q_1(t)$는 각각 지천 합류점의 본류상류에 위치한 수질 및 수위 관측소의 탁도와 유량, $c_2(t)$와 $Q_2(t)$는 각각 지천의 유입 탁도와 유량이다. 지천 합류점에서 하류경계까지의 유하시간을 t_0로 표시하면, 이송항만을 고려하는 준정상류 물질보존방정식은 Eq. 4와 같다.

$$c_1(t-t_0)Q_1(t-t_0)+c_2(t-t_0)Q_2(t-t_0)=c_0(t)Q_0(t) \quad \text{(Eq. 4)}$$

여기서, $c_0(t)$와 $Q_{01}(t)$는 각각 지천 합류점의 본류하류에 위치한 수질 및 수위 관측소의 탁도와 유량이다.

Table 1. Unknowns and input data of models

Model	Unknown	Input data
Flow and turbidity analysis model	Time-variant turbidity in the downstream direction	Inflow turbidity of the main stream and tributaries
Turbidity backward tracking model	Time-variant turbidity of a tributary	Turbidity at the main stream located upstream and downstream of the tributary

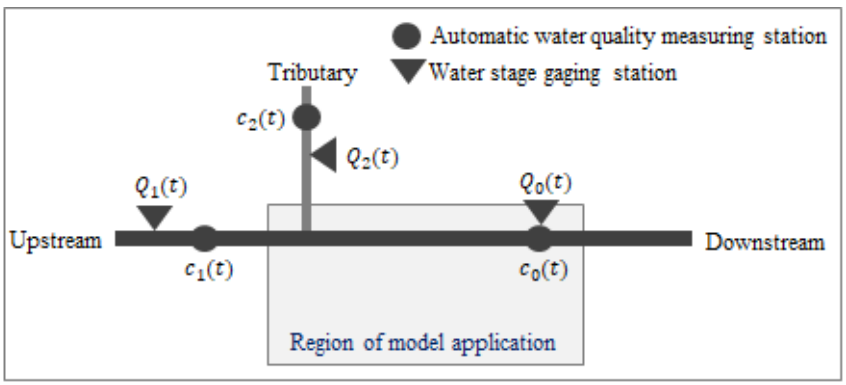


Fig. 2. Schematic diagram for the turbidity backward tracking model (Lee and Kim 2023).

Eq. 4에서 구하고자 하는 변수는 지천에 위치한 수질자동측정소의 탁도 이므로, 미지수를 구하기 위한 방정식은 아래와 같다.

$$c_2(t-t_0) = \frac{c_0(t)Q_0(t) - c_1(t-t_0)Q_1(t-t_0)}{Q_2(t-t_0)} \quad \text{(Eq. 5)}$$

Eq. 5에서 유하시간 t_0는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$t_0 = \sum_{i=1}^{N}\left(\frac{D_i}{V_i}\right) \quad \text{(Eq. 6)}$$

여기서, N은 역추적구간에 위치한 단면구간의 개수, D_i는 각 구간거리, V_i는 각 구간의 평균유속이다.

탁도 역추적기법으로 세 가지 추적방법을 적용하였다. 추적방법-1은 유하시간을 고려한 탁도부하량 보존식을 단순한 식으로 표현한 것으로 Eq. 7의 추적식을 사용하는 방법이다. 추적방법-2는 탁도부하량 수지의 정합성을 개선하기 위해 유하시간을 고려한 상류경계의 유량을 하류경계의 유량으로 사용하는 방법으로 Eq. 8과 같이 표현할 수 있다. 추적방법-3은 탁도 유발물질의 거동특성을 반영하기 위해 내부반응률(보통은 감소율로 표현함) r을 도입한 방법이다. 내부반응률 r은 하도에서 침강에 의한 탁도 감소 또는 재부상에 의한 탁도 증가를 표현하는 파라미터이며, 따라서 추적방법-3은 Eq. 9와 같이 표현할 수 있다. 세 가지 추적식을 정리하면 아래와 같다.

추적식-1:

$$c_2(t-t_0) = \frac{c_0(t)Q_0(t) - c_1(t-t_0)Q_1(t-t_0)}{Q_2(t-t_0)} \quad \text{(Eq. 7)}$$

추적식-2:

$$c_2(t-t_0) = \frac{c_0(t)[Q_1(t-t_0)+Q_2(t-t_0)] - c_1(t-t_0)Q_1(t-t_0)}{Q_2(t-t_0)} \quad \text{(Eq. 8)}$$

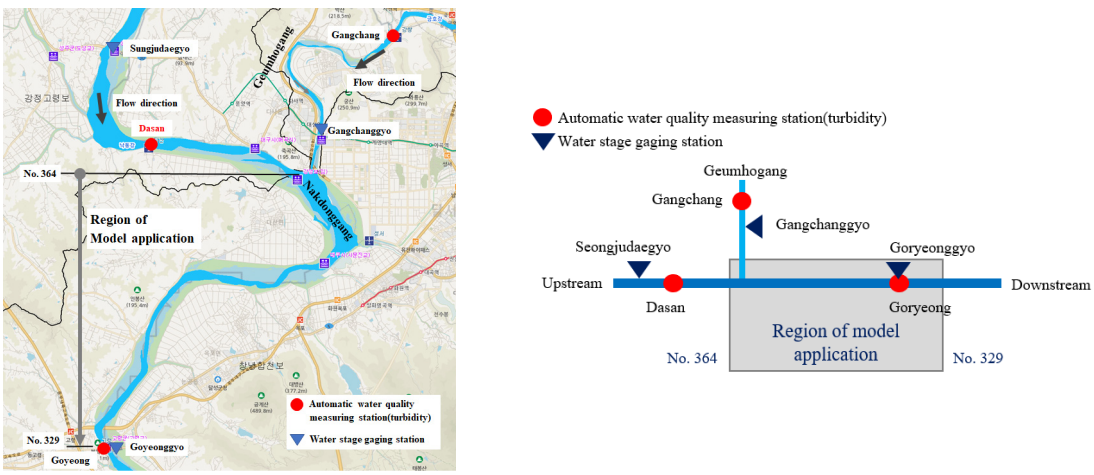
추적식-3:

$$c_2(t-t_0) = r\frac{c_0(t)[Q_1(t-t_0)+Q_2(t-t_0)] - c_1(t-t_0)Q_1(t-t_0)}{Q_2(t-t_0)} \quad \text{(Eq. 9)}$$

3. 결과 및 고찰

3.1 역추적모형의 입력자료 구축

탁도 역추적모형을 실제 수문사상에 적용하기 위해서는 모형 적용영역 및 적용기간을 먼저 결정하고 입력자료를 구축해야 한다. 하천의 기하학적 자료(geometric data) 입력이 완성된 HEC-RAS 모형은 Fig. 3과 같다. HEC-RAS 모델링을 위한 낙동강 단면 자료는 2017년 하천측량 자료를 사용하였으며, 안정적인 수치모델링을 위해 교량 단면과 인라인구조물(inline structure) 단



(a) Site map (b) Schematic diagram

Fig. 3. Application region of backtracking model (Lee and Kim 2023).

면은 제거하고 기본단면만 사용하였다. 모형 적용구간의 하천기본계획 단면은 금호강 합류점 직상류에 위치한 No. 364 단면에서 고령교 직하류의 No. 329 단면까지 36개 단면이다. 탁도 역추적모델링 구간의 총 하도길이는 17.61 km이다.

탁도 역추적모형의 적용기간은 2017.12.10.일부터 2018.02.27.일까지 80일을 대상으로 하였다. 1차원 HEC-RAS 모형의 수리학적 추적 결과를 사용하여 계산한 역추적모형 적용구간의 평균유하시간는 7일이며, 따라서 강창 수질자동측정점의 탁도 예측 가능 기간은 2017.12.10.일부터 2018.02.20.일까지 73일이 된다.

탁도 역추적모형 적용에 사용한 측정자료는 이 기간에 측정된 다산, 강창, 고령 수질자동측정소의 일평균 탁도로 Fig. 4와 같다. 측정된 일평균 탁도의 최소값은 0.6 NTU (강창 수질자동측정소)이고, 최대값은 5.1 NTU (강창 수질자동측정소)이다. 하천 수리량 계산 (HEC-RAS)을 위해 상류 경계조건으로는 성주군 (성주대교)와 대구시 (강창교) 수위관측소의 일평균 유량을 사용하였으며, Fig. 5와 같다. 일유량의 최소값은 8.56 이고, 최대값은 121.1 이다. 하류 경계조건으로는 고령군 (고령교) 수위관측소의 일평균 수위를 사용하였으며, Fig. 6과 같다. 일수위의 최소값은 El. 13.48 m 이고, 최대값은 El. 13.61 m이다.

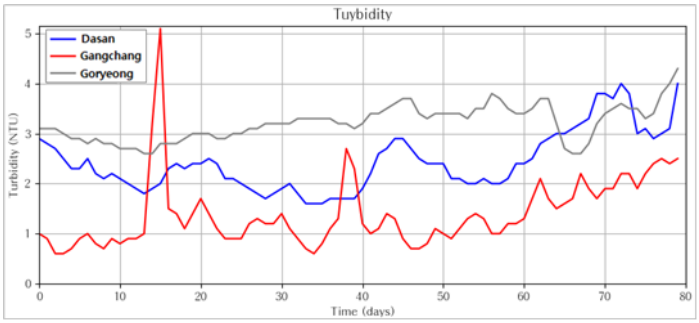


Fig. 4. Daily average turbidity for transient turbidity simulation (2017.12.10. - 2018.02.27.).

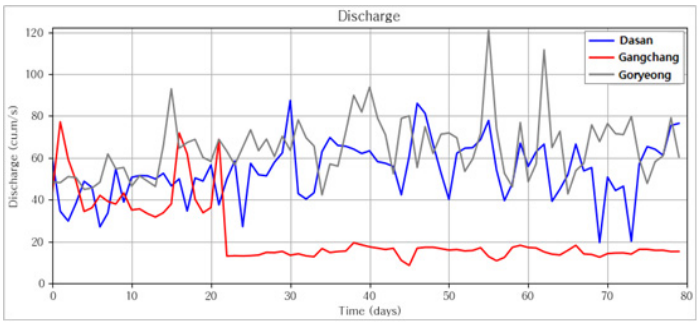


Fig. 5. Daily average discharge for transient turbidity simulation (2017.12.10. - 2018.02.27.).

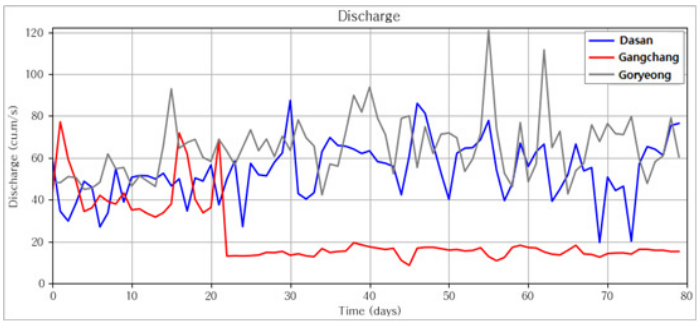


Fig. 6. Goryeong Bridge daily average water level for simulation of transient turbidity (2017.12.10. - 2018.02.27.).

3.2 역추적모형의 적용

세 가지 역추적모형을 적용하여 탁도예측 정확도를 비교하였다. 정확도는 Eq. 10의 오차(error)와 Eq. 11의 상대오차(relative error)을 사용하여 비교하였다.

$$E = c_p - c_m \quad \text{(Eq. 10)}$$

$$E_r = \frac{c_p - c_m}{c_m} \times 100\% \quad \text{(Eq. 11)}$$

여기서 c_p는 탁도 추정(계산)값, c_m은 탁도 측정값이다.

Table 2는 추적식-1, Eq. 7의 적용결과이며, 강창 수질자동측정소 탁도 역추정값의 평균은 5.4 NTU로 계산되었다. 추정편차는 4.1 NTU이며, 상대오차는 386%

Table 2. Result of application of backtracking model (Tracking equation-1)

Date	Measured	Predicted	Error	Relative error	Date	Measured	Predicted	Error	Relative error
2017-12-10	1.0	0.1	-0.9	-85%	2018-01-16	1.3	11.2	9.9	759%
2017-12-11	0.9	0.7	-0.2	-18%	2018-01-17	1.3	9.7	8.4	643%
2017-12-12	0.6	1.3	0.7	110%	2018-01-18	1.3	5.4	4.1	315%
2017-12-13	0.6	0.6	0.0	0%	2018-01-19	1.3	7.7	6.4	493%
2017-12-14	0.7	0.8	0.1	10%	2018-01-20	1.3	4.6	3.3	251%
2017-12-15	0.9	0.7	-0.2	-19%	2018-01-21	1.3	5.8	4.5	343%
2017-12-16	1.0	1.3	0.3	26%	2018-01-22	1.3	5.6	4.3	330%
2017-12-17	0.8	2.5	1.7	211%	2018-01-23	1.3	10.4	9.1	700%
2017-12-18	0.7	3.8	3.1	448%	2018-01-24	1.3	0.6	-0.7	-52%
2017-12-19	0.9	2.2	1.3	145%	2018-01-25	1.3	-2.1	-3.4	-265%
2017-12-20	0.8	2.3	1.5	193%	2018-01-26	1.3	2.8	1.5	116%
2017-12-21	0.9	2.7	1.8	202%	2018-01-27	1.3	15.3	14.0	1079%
2017-12-22	0.9	2.5	1.6	176%	2018-01-28	1.3	9.3	8.0	617%
2017-12-23	1.0	2.7	1.7	168%	2018-01-29	1.3	6.2	4.9	376%
2017-12-24	3.2	3.2	-0.0	-1%	2018-01-30	1.3	1.9	0.6	47%
2017-12-25	5.1	2.4	-2.7	-53%	2018-01-31	1.3	8.1	6.8	525%
2017-12-26	1.5	0.7	-0.8	-54%	2018-02-01	1.3	2.3	1.0	74%
2017-12-27	1.4	1.8	0.4	29%	2018-02-02	1.3	3.7	2.4	183%
2017-12-28	1.1	2.6	1.5	136%	2018-02-03	1.3	19.5	18.2	1398%
2017-12-29	1.4	2.3	0.9	68%	2018-02-04	1.3	12.2	10.9	837%
2017-12-30	1.7	2.2	0.5	27%	2018-02-05	1.3	12.4	11.1	854%
2017-12-31	1.4	1.5	0.1	4%	2018-02-06	1.3	0.9	-0.4	-33%
2018-01-01	1.1	8.1	7.0	637%	2018-02-07	1.3	-1.1	-2.4	-188%
2018-01-02	0.9	6.1	5.2	579%	2018-02-08	1.3	0.9	-0.4	-33%
2018-01-03	0.9	14.8	13.9	1540%	2018-02-09	1.3	3.2	1.9	150%
2018-01-04	0.9	8.7	7.8	867%	2018-02-10	1.3	2.0	0.7	56%
2018-01-05	1.2	8.7	7.5	628%	2018-02-11	1.3	10.5	9.2	706%
2018-01-06	1.3	3.2	1.9	144%	2018-02-12	1.3	8.5	7.2	554%
2018-01-07	1.2	6.1	4.9	410%	2018-02-13	1.3	6.3	5.0	388%
2018-01-08	1.2	4.8	3.6	296%	2018-02-14	1.3	4.0	2.7	208%
2018-01-09	1.4	4.9	3.5	250%	2018-02-15	1.3	2.6	1.3	98%
2018-01-10	1.1	14.3	13.2	1200%	2018-02-16	1.3	-1.8	-3.1	-240%
2018-01-11	0.9	13.8	12.9	1436%	2018-02-17	1.3	9.9	8.6	661%
2018-01-12	0.7	18.1	17.4	2490%	2018-02-18	1.3	2.7	1.4	108%
2018-01-13	0.6	10.1	9.5	1585%	2018-02-19	1.3	10.5	9.2	710%
2018-01-14	0.8	8.8	8.0	1002%	2018-02-20	1.3	5.1	3.8	293%
2018-01-15	1.1	4.7	3.6	325%	Average	1.3	5.4	4.1	386%

이다. 유량 측정자료의 유량수지의 정합성이 부족하기 때문에 탁도가 음수로 예측되는 현상이 2018.01.25., 2018.02.07., 2018.02.16일에 발생하였다.

Table 3은 추적식-2, Eq. 8의 적용결과이며, 강창 수질자동측정소 탁도 역추정값의 평균은 6.3 NTU로 계산되었다. 추정편차는 5.0 NTU이며, 상대오차는 451%이다. 유량수지를 맞추었기 때문에 탁도가 음수로 예측되는 현상은 발생하지 않았으나, 추정편차와 상대오차

Table 3. Result of application of backtracking model (Tracking equation-2)

Date	Measured	Predicted	Error	Relative error	Date	Measured	Predicted	Error	Relative error
2017-12-10	1.0	2.9	1.9	190%	2018-01-16	1.3	11.7	10.4	798%
2017-12-11	0.9	2.8	1.9	211%	2018-01-17	1.3	10.3	9.0	693%
2017-12-12	0.6	2.9	2.3	375%	2018-01-18	1.3	10.5	9.2	704%
2017-12-13	0.6	2.9	2.3	376%	2018-01-19	1.3	8.8	7.5	580%
2017-12-14	0.7	3.3	2.6	367%	2018-01-20	1.3	7.1	5.8	447%
2017-12-15	0.9	3.2	2.3	256%	2018-01-21	1.3	6.2	4.9	380%
2017-12-16	1.0	2.7	1.7	166%	2018-01-22	1.3	5.7	4.4	341%
2017-12-17	0.8	2.9	2.1	268%	2018-01-23	1.3	5.3	4.0	310%
2017-12-18	0.7	3.8	3.1	444%	2018-01-24	1.3	7.0	5.7	435%
2017-12-19	0.9	3.3	2.4	271%	2018-01-25	1.3	6.4	5.1	390%
2017-12-20	0.8	3.8	3.0	376%	2018-01-26	1.3	8.2	6.9	532%
2017-12-21	0.9	4.2	3.3	367%	2018-01-27	1.3	7.7	6.4	496%
2017-12-22	0.9	4.7	3.8	422%	2018-01-28	1.3	8.3	7.0	535%
2017-12-23	1.0	4.9	3.9	389%	2018-01-29	1.3	7.0	5.7	437%
2017-12-24	3.2	4.7	1.5	47%	2018-01-30	1.3	8.9	7.6	584%
2017-12-25	5.1	4.0	-1.1	-21%	2018-01-31	1.3	8.8	7.5	579%
2017-12-26	1.5	3.3	1.8	121%	2018-02-01	1.3	9.2	7.9	607%
2017-12-27	1.4	3.3	1.9	138%	2018-02-02	1.3	9.6	8.3	636%
2017-12-28	1.1	3.9	2.8	253%	2018-02-03	1.3	13.4	12.1	933%
2017-12-29	1.4	4.1	2.7	194%	2018-02-04	1.3	12.2	10.9	841%
2017-12-30	1.7	4.2	2.5	147%	2018-02-05	1.3	7.0	5.7	441%
2017-12-31	1.4	3.6	2.2	156%	2018-02-06	1.3	4.4	3.1	236%
2018-01-01	1.1	6.3	5.2	469%	2018-02-07	1.3	3.3	2.0	157%
2018-01-02	0.9	8.1	7.2	800%	2018-02-08	1.3	3.3	2.0	150%
2018-01-03	0.9	5.5	4.6	509%	2018-02-09	1.3	3.9	2.6	201%
2018-01-04	0.9	8.9	8.0	894%	2018-02-10	1.3	5.0	3.7	282%
2018-01-05	1.2	8.7	7.5	623%	2018-02-11	1.3	4.8	3.5	270%
2018-01-06	1.3	8.5	7.2	555%	2018-02-12	1.3	5.2	3.9	297%
2018-01-07	1.2	9.6	8.4	701%	2018-02-13	1.3	5.6	4.3	329%
2018-01-08	1.2	9.4	8.2	686%	2018-02-14	1.3	5.0	3.7	282%
2018-01-09	1.4	11.7	10.3	733%	2018-02-15	1.3	4.6	3.3	257%
2018-01-10	1.1	6.8	5.7	522%	2018-02-16	1.3	3.3	2.0	154%
2018-01-11	0.9	7.1	6.2	688%	2018-02-17	1.3	2.8	1.5	114%
2018-01-12	0.7	8.6	7.9	1135%	2018-02-18	1.3	3.8	2.5	192%
2018-01-13	0.6	10.2	9.6	1604%	2018-02-19	1.3	4.9	3.6	278%
2018-01-14	0.8	11.9	11.1	1390%	2018-02-20	1.3	5.3	4.0	305%
2018-01-15	1.1	11.3	10.2	927%	Average	1.3	6.3	5.0	451%

는 방법-1에 비해 20%가 증가하는 결과를 보이고 있다.

Table 4는 추적식-3, Eq. 9의 적용결과로 내부반응률은 0.2를 사용하였다. 강창 수질자동측정소 탁도 역추정값의 평균은 1.3 NTU로 계산되었다. 추정편차는 0.0 NTU, 상대오차는 10%로 내부반응률을 도입할 경우 역추정 결과가 상당히 개선됨을 볼 수 있다. Fig. 7은 세 가지 역추적모형의 적용 결과를 도시한 것으로 추적식-3의 역추적 결과가 가장 우수함을 확인할 수 있다.

Table 4. Result of application of backtracking model (Tracking equation-3)

Date	Measured	Predicted	Error	Relative error	Date	Measured	Predicted	Error	Relative error
2017-12-10	1.0	0.6	-0.4	-42%	2018-01-16	1.3	2.3	1.0	80%
2017-12-11	0.9	0.6	-0.3	-38%	2018-01-17	1.3	2.1	0.8	59%
2017-12-12	0.6	0.6	-0.0	-5%	2018-01-18	1.3	2.1	0.8	61%
2017-12-13	0.6	0.6	-0.0	-5%	2018-01-19	1.3	1.8	0.5	36%
2017-12-14	0.7	0.7	-0.0	-7%	2018-01-20	1.3	1.4	0.1	9%
2017-12-15	0.9	0.6	-0.3	-29%	2018-01-21	1.3	1.2	-0.1	-4%
2017-12-16	1.0	0.5	-0.5	-47%	2018-01-22	1.3	1.1	-0.2	-12%
2017-12-17	0.8	0.6	-0.2	-26%	2018-01-23	1.3	1.1	-0.2	-18%
2017-12-18	0.7	0.8	0.1	9%	2018-01-24	1.3	1.4	0.1	7%
2017-12-19	0.9	0.7	-0.2	-26%	2018-01-25	1.3	1.3	-0.0	-2%
2017-12-20	0.8	0.8	-0.0	-5%	2018-01-26	1.3	1.6	0.3	26%
2017-12-21	0.9	0.8	-0.1	-7%	2018-01-27	1.3	1.5	0.2	19%
2017-12-22	0.9	0.9	0.0	4%	2018-01-28	1.3	1.7	0.4	27%
2017-12-23	1.0	1.0	-0.0	-2%	2018-01-29	1.3	1.4	0.1	7%
2017-12-24	3.2	0.9	-2.3	-71%	2018-01-30	1.3	1.8	0.5	37%
2017-12-25	5.1	0.8	-4.3	-84%	2018-01-31	1.3	1.8	0.5	36%
2017-12-26	1.5	0.7	-0.8	-56%	2018-02-01	1.3	1.8	0.5	41%
2017-12-27	1.4	0.7	-0.7	-52%	2018-02-02	1.3	1.9	0.6	47%
2017-12-28	1.1	0.8	-0.3	-29%	2018-02-03	1.3	2.7	1.4	107%
2017-12-29	1.4	0.8	-0.6	-41%	2018-02-04	1.3	2.4	1.1	88%
2017-12-30	1.7	0.8	-0.9	-51%	2018-02-05	1.3	1.4	0.1	8%
2017-12-31	1.4	0.7	-0.7	-49%	2018-02-06	1.3	0.9	-0.4	-33%
2018-01-01	1.1	1.3	0.2	14%	2018-02-07	1.3	0.7	-0.6	-49%
2018-01-02	0.9	1.6	0.7	80%	2018-02-08	1.3	0.7	-0.6	-50%
2018-01-03	0.9	1.1	0.2	22%	2018-02-09	1.3	0.8	-0.5	-40%
2018-01-04	0.9	1.8	0.9	99%	2018-02-10	1.3	1.0	-0.3	-24%
2018-01-05	1.2	1.7	0.5	45%	2018-02-11	1.3	1.0	-0.3	-26%
2018-01-06	1.3	1.7	0.4	31%	2018-02-12	1.3	1.0	-0.3	-21%
2018-01-07	1.2	1.9	0.7	60%	2018-02-13	1.3	1.1	-0.2	-14%
2018-01-08	1.2	1.9	0.7	57%	2018-02-14	1.3	1.0	-0.3	-24%
2018-01-09	1.4	2.3	0.9	67%	2018-02-15	1.3	0.9	-0.4	-29%
2018-01-10	1.1	1.4	0.3	24%	2018-02-16	1.3	0.7	-0.6	-49%
2018-01-11	0.9	1.4	0.5	58%	2018-02-17	1.3	0.6	-0.7	-57%
2018-01-12	0.7	1.7	1.0	147%	2018-02-18	1.3	0.8	-0.5	-42%
2018-01-13	0.6	2.0	1.4	241%	2018-02-19	1.3	1.0	-0.3	-24%
2018-01-14	0.8	2.4	1.6	198%	2018-02-20	1.3	1.1	-0.2	-19%
2018-01-15	1.1	2.3	1.2	105%	평균	1.3	1.3	0.0	10%

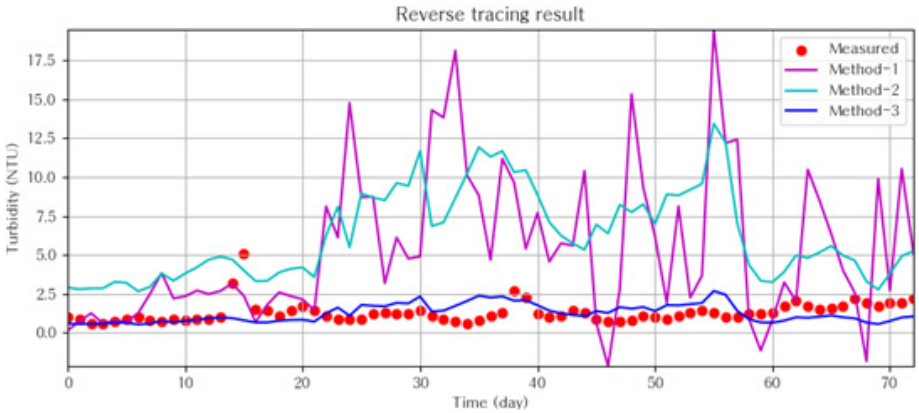


Fig. 7. Result of application of backtracking model.

4. 결 론

역추적기법에 대한 기존 연구는 대부분 차별적 특징을 갖는 정보성분, 화학성분, 방사능성분 등을 갖는 경우에 대한 역추적기술에 해당한다. 차별적 특징을 갖지 않는 탁도 측정자료에 대한 역추적기법을 개발하고자 이 연구에서는 지천의 상류와 하류에 위치한 수질자동측정점에서 측정된 실시간 탁도자료와 Py_STPS모형을 사용하여 지천의 유입탁도를 예측하는 탁도역추적기법을 개발하였다.

유하시간을 고려한 탁도부하량 단순보존 방법, 유하시간을 고려한 상류경계의 유량을 하류경계의 유량으로 사용하는 방법, 탁도 유발물질의 거동특성을 반영하기 위해 내부반응률을 도입한 방법 세 가지 탁도 역추적기법을 적용하였다.

세 가지 역추적모형을 적용하여 탁도예측 정확도를 비교하였다. 추적식-1을 적용한 결과, 강창 수질자동측정소 탁도 역추정값의 평균은 5.4 NTU로 계산되었다. 추정편차는 4.1 NTU이며, 상대오차는 386%이다. 유량측정자료의 유량수지의 정합성이 부족하기 때문에 탁도가 음수로 예측되는 현상이 2018.01.25., 2018.02.07., 2018.02.16일에 발생하였다.

추적식-2를 적용한 결과, 강창 수질자동측정소 탁도 역추정값의 평균은 6.3 NTU로 계산되었다. 추정편차는 5.0 NTU이며, 상대오차는 451%이다. 유량수지를 맞추었기 때문에 탁도가 음수로 예측되는 현상은 발생하지 않았으나, 추정편차와 상대오차는 방법-1에 비해 20%가 증가하는 결과를 보이고 있다.

내부반응률 $r = 0.2$를 사용하여 추적식-3을 적용한 결과, 강창 수질자동측정소 탁도 역추정값의 평균은 1.3 NTU로 계산되었다. 추정편차는 0.0 NTU, 상대오차는 10%로 내부반응률을 도입할 경우 역추정 결과가 상당히 개선됨을 볼 수 있다. 세 가지 역추적모형의 적용 결과를 도시한 것으로 추적식-3의 역추적 결과가 가장 우수함을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원 수생태계 건강성 확보 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다 (2020003050002).

References

Bae, M., Kim, H.C., Kim, B.-U., and Kim, S. 2017. Development and application of the backward-tracking model analyzer to track physical and chemical processes of air parcels during the transport. J. of Korean Society for Atmospheric Environment 33(3): 217-232. (in Korean)

Hopke, P.K., Ramadan, Z. Paatero, P. Norris, G.A. Landis, M.S. Williams, R.W. and Lewis, C.W. 2003. Receptor modeling of ambient and personal exposure samples: 1998 Baltimore Particulate Matter Epidemiology-Exposure study. Atmospheric Environment 37: 3289-3302.

Kim, J.T., Han, M.H., Lee, J.H., Kim, J.H., and Kim, I.K. 2014. Technical Trends of the Cyber Attack Traceback. Electronics and Telecommunications Trends 29(1): 93-103. (in Korean)

Kim, T.B. and Choi, U.H. 2005. Analysis of trends and application cases of backtracking technology. Review of KIISC 15(1): 98-103. (in Korean)

Kwon, S.Y., Seo, I.W., and Noh, H. 2019. Development

of contaminant source inverse tracking model considering transient storage zone characteristics. Proc. of KSCE 2019 Convention, WE17-WE18. (in Korean)

Lee, J.H., Kim, S.J., and Jeong, J.H. 2007. Source apportionment of aerosols using air parcel backward trajectories. Chungnam Nat'l. U., Report no.: KAERI/CM-1151-2006. (in Korean)

Lee, N. and Heo, S. N. 2007. Development of STPS for turbidity prediction along the Nakdong River due to very fine soil. J. of Korean Society of Water Science and Technology 15(3): 11-21. (in Korean)

Lee, N. and Kim, C.S. 2023. An Applicability Review on Simplified Turbidity Prediction Model Py_STPS Using the Measured Data of the Nakdong River. J. of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society 24(2): 521-529. (in Korean)

Lee, N., Choi, S., and Kim, C.-S. 2021. Applicability test of STPS for HEC-RAS-based turbidity prediction model in the Nagdonggang. Ecology and Resilient Infrastructure 8(4): 245-252.

Lupu, A. and Maenhaut, W. 2002. Application and comparison of two statistical trajectory techniques for identification of source regions of atmospheric aerosol species. Atmospheric Environment 36(36-37): 5607-5618.

NIER, 2012. A study on tracking sources of pollutants using heavy metal isotope analysis (1). NIER-RP2012-303. (in Korean)

Park, H.Y., Park, H.S., Lee, B.R., Choi, H.J., Kim, H.R., Lim, H.J., Park, C.O, Kim, I.S., Park, G.H., Jeon, D.Y., and Bae, M.S. 2022. Source assessment of PM-2.5 in the residential areas of Gwangyang Bay using source apportionment model(II). J. of Environmental Analysis, Health and Toxicology 25(1): 18-32. (in Korean)