



금호강 유역에서의 4-nitrophenol 배출 특성과 오염원 기여도 모의 연구

Study on the simulation of emission characteristics and sources contribution of 4-nitrophenol in the Geumho River

박경덕¹·양득석²·이인정²·김일규^{3*}

Kyeong-Deok Park¹·Duk-Seok Yang²·In-Jung Lee²·Il-Kyu Kim^{3*}

¹부경대학교 마린융합디자인협동과정, 부산광역시 남구 용소로 45, 48513

²낙동강물환경연구소, 경상북도 고령군 다산면 평리길 24, 40103

³부경대학교 환경공학과, 부산광역시 남구 용소로 45, 48513

¹Interdisciplinary Program of Marine Convergence Design, Pukyong National University, 45, Yongso-ro, Nam-gu, Busan, 48513, South Korea

²Nakdong River Environment Research Center, 24, Pyeongri-1gil, dasan-myeon, Goryeong-gun, Gyeongsangbuk-do 71, 40103, South Korea

³Department of Environmental Engineering, Pukyong National University, 45, Yongso-ro, Nam-gu, Busan, 48513, South Korea

pp. 001-008

pp. 009-016

pp. 017-029

pp. 031-041

pp. 043-053

pp. 055-062

pp. 063-077

pp. 079-086

ABSTRACT

In the Geumho River, 4-nitrophenol has been detected, thus it is necessary to investigate the contamination sources in order to prevent the release of this compound. However, the research to estimate the potential source is regarded as complicated research. In this study, the distributions of 4-nitrophenol were simulated and the contribution of the potential sources was estimated using a numerical model(HydroGeoSphere; HGS) and the measuring data of 4-nitrophenol from 2013 to 2017. The altitude data, the land cover data, the flow rates of the tributaries and wastewater treatment plants, and the decay rate of 4-nitrophenol was used as the input data. The results of this research showed that the contribution rates of potential contamination sources in the upstream area were higher than that of the downstream area. Most of the upstream area is the agricultural area, it seemed that 4-nitrophenol was originated from the pesticides. In order to achieve more specific location of sources, an intensive investigation in the upstream is required.

Key words: HydroGeoSphere, Contribution rate, Pollutant distribution, Potential source, Numerical model

주제어: HydroGeoSphere, 기여율, 오염 분포, 잠재 오염원, 수치 모형

1. 서 론

과학과 산업의 발달로 인하여 수많은 유기화합물질이 생겨나게 되었으며, 이들은 생필품, 의약 등 없어서는 안 될 중요한 물질로 여겨지고 있다. 그러나 이들 물질의 개발과 더불어 이와 관련된 다양한 환경오염문

제가 발생하고 있다. 대부분의 유기화합물질은 필요에 따라 인공적으로 만들어졌으므로, 자연계에는 존재하지 않는다. 그러므로 이들 물질이 자연계에 유입될 경우 어떤 영향을 미치게 되는지 자세한 영향은 알기 어려우나, 대부분의 경우 수중에 유입되어 수중 생물에게 독성과 생물농축을 일으키는 것으로 알려져 있다. 그러므로 이들 물질을 취급하는 산업 공정에서는 자연계로의 유입을 최대한 방지하려는 노력이 필요하다.

Received 10 September 2018, revised 26 November 2018, accepted 14 December 2018.

*Corresponding author: Il-Kyu Kim (E-mail: kimilky523@gmail.com)

이러한 이유로 오염원 관련 연구가 전 세계에서 활발히 진행되고 있다. 그러나 특정 유기오염물질에 대한 오염원을 추정하기 위해서는 먼저 대상 물질의 수계 내에서의 거동과 사용범위, 유역에 존재하는 산업 구조를 먼저 조사하여야 한다 (Liu and Ball, 1999). 또한 COD나 영양염류와 같은 일반적인 수질분석에 비해 인력과 시간이 더 많이 소요되므로 조사지점의 개수나 분석횟수에 있어 제한이 있으며, 이로 인해 연속적인 데이터를 얻기 힘들며, 한정된 모니터링 자료를 이용하여 불특정 오염원의 위치와 유출량 또한 함께 모의하기 때문에 일반적인 모의보다는 불확실성이 더욱 크다 (Cheng and Jia, 2010). 그리고 지표수를 대상으로 모의할 경우 유속이 빠르다 보니 기상과 주위 환경에도 영향을 많이 받으므로, 비교적 추정이 쉽지 않다 (Li et al., 2016). 또한 우리나라의 경우 산업단지의 밀집도가 높고, 다양한 산업구조가 혼재해 있으므로, 오염원을 추정하는 데 어려움이 있다. 그럼에도 불구하고 불특정 오염원에 대하여 어느 정도 정량적인 평가가 가능하다는 장점이 있어 연구의 중요성이 부각되며, 현재까지도 다양한 방법이 시도되고 있다 (Liu and Ball, 1999; Mahar and Datta, 2001; Cheng and Jia, 2010; Li et al., 2016).

오염원 추정 연구는 주로 알고리즘이나 통계기법을 이용하여 수행하였다. Katopodes and Piasecki (1996)와 Piasecki and Katopodes (1997)는 유한차분법을 이용하여 강과 하구에 위치하는 오염원에 대한 환경 영향을 평가하여 배출량 조절에 대한 가이드라인을 제시하였다. El Badia et al. (2005)은 확산-이류 방정식을 이용하여 강에서의 COD와 BOD에 대한 오염원 추정에 적용하였다. Cheng and Jia (2010)는 역추적 기법을 이용하여 강에서의 점오염원을 추정하였고, Zhang and Xin (2016)은 유전 알고리즘(genetic algorithm)으로, Li et al. (2016)은 신경망 기법(radial basis collocation method)을 이용하여 오염원을 추정하였다. 이들 연구는 오염원에 대한 추정을 가능하게 하였다는 점에서 의미가 있다고 볼 수 있다.

본 연구에서는 다양한 산업이 혼재해 있는 금호강 유역을 대상으로 연구를 수행하였다. 이전 연구 (Park and Kim, 2017; Park et al., 2017)에서는 2015년 갈수기를 대상으로 유해물질의 거동을 모의하고 오염원을 평가하였다면, 본 연구에서는 5년간의 모니터링 자료를 이용하여 연도별 기여율 변화를 관찰하고, 또

한 연도별로 발생하는 공통적인 특징을 파악하여 배출가능성이 높은 지역을 선정하여 향후 금호강 유역에 대한 유해물질관리 정책 수립에 활용될 것으로 기대된다.

2. 연구방법

2.1 수치모형 선정

본 연구에 사용된 모형인 HydroGeoSphere(HGS)는 3차원 지하수 모형인 FRAC3DVS에서 2차원 지표수 영역까지 확장, 개발한 모형으로, 지표수 영역과 지하수 영역 및 이 두 영역 사이의 상호작용까지 표현 가능하도록 설계되었다. HGS는 정상상태 뿐만 아니라 다양한 포화도를 가지는 지하수 영역 및 지표수-지하수 영역 사이의 물 흐름이나 물질 거동 등에 대하여 모의가 가능하다 (Brunner and Simmons, 2012).

국내에서는 주로 수자원 확보에 관한 연구를 중심으로 진행되었다. KIGAM (2011)은 제주도를 대상으로 지하수 인공함양 실용화 평가를 수행한 바 있다. Lee et al. (2008)은 HGS로 다양한 지하수 흐름을 반영하여 방사 집수정을 활용한 강변 여과수 개발에 사용하였으며, Noh (2010)는 다양한 가상의 지형을 구성하여 지표유출과 침투 등의 모의를 수행하여 활용 가능성을 평가한 한편 전라북도 무주군을 대상으로 현장 적용을 수행하였다. Kang et al. (2017)은 밀양시 시설 농업단지의 지표수 및 지하수 유동을 모의하고 물수지 분석을 통해 지하수 함양량을 산정하였다.

국외의 경우 국내에 비해 물질 거동이나 에너지 이동 등 다양한 분야에 이용되고 있다. Frei et al. (2010)은 독일 동남부 Lehstenbach 지역의 습지를 대상으로 지표수와 지하수 영역간의 상호교환과 지표 유출 및 이에 따른 영양염류의 거동을 모의한 바 있으며, Mustapha et al. (2011)은 균열이 있는 지하층을 흐르는 지하수의 유량과 물질의 거동을 모의하여 비교적 정밀한 결과를 도출하였다. Partington et al. (2013)은 습지를 대상으로 지면에 직접 떨어지는 강수량과 지하수에서 지표수로 이동하는 유량을 모의하였다. Rasoulzadeh and Ghoorabjiri (2014)는 3종류의 숲(활엽수림, 침엽수림, 혼합림)에 따른 수리학적 특성을 비교하는 연구를 수행하였으며, Guan et al. (2014) 또한 폭우 시 산사태를 예방하기 위한 목적으로 강우 시

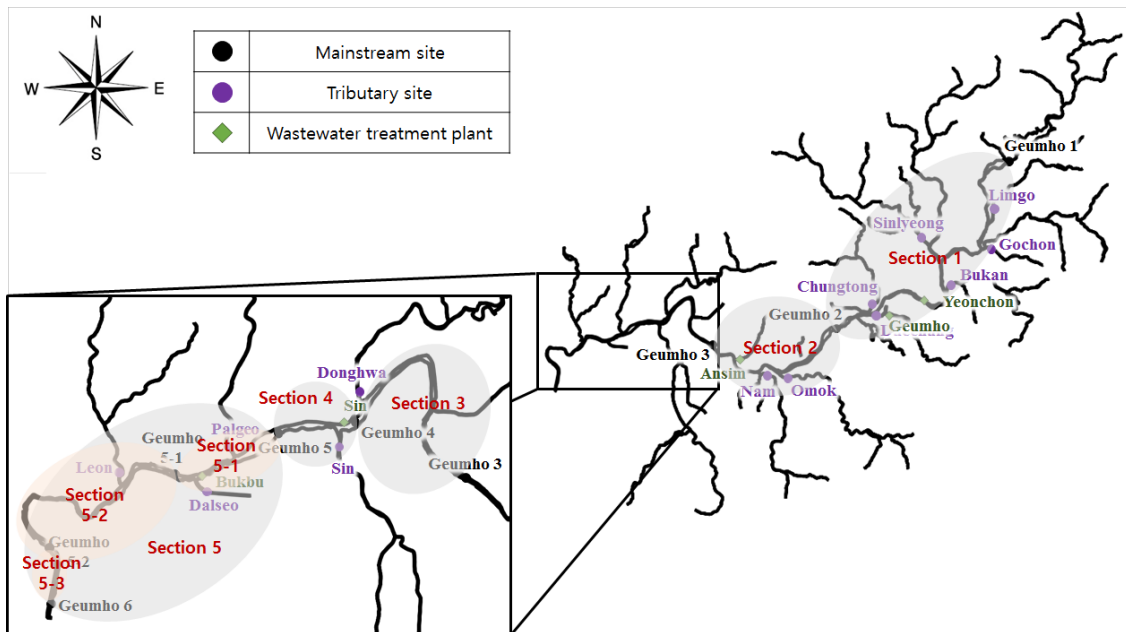


Fig. 1. Distribution of the sampling sites.

토양 침투량, 지표수 유출량, 공극의 수압 및 응력을 예측하였다. Yin (2009)과 Yin et al. (2015)은 TCE를 대상으로 지하수 내 거동을 모의하는 데 필요한 시간적, 공간적 변수를 조절하여 오염거동을 파악하는 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 지표수 영역만을 고려하여 정상 상태에서 같은 농도로 유출될 경우의 4-nitrophenol의 거동과 오염 기여율을 평가하였다.

2.2 대상유역

금호강은 낙동강의 지류 중 하나로서, 포항시 북구에서 발원하여 영천시, 경산시, 대구광역시를 통과하여 성서 지역에서 낙동강과 합류한다 (Fig.1).

이 지역에서는 70년대 급격한 산업화가 진행되어 산업폐수가 다량 발생하였으며, 영천댐의 축조로 인하여 유량이 감소하여 자정능력이 감소하였다. 또한 1991년 폐놀 유출사고 등으로 주목받기도 하였다. 최근에는 하수처리장과 같은 대규모 정화시설들을 설치하는 한편, 유해물질에 대한 각종 연구조사를 실시하여 금호강의 수질이 많이 개선되었으나, 현재까지도 다양한 형태의 오염원이 존재하며 비록 미량이지만 각종 유기물질이 검출되고 있어 이들에 대한 수자원 관리 대책 마련이 필요한 실정이다.

2.3 대상 유해물질 조사

본 연구의 대상물질로 선정된 4-nitrophenol은 금호강 대부분의 지점에서 검출된 바 있다 (Nakdong River Watershed Management Committee, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017). 4-nitrophenol은 농약류나 염료, 의약품, 고무 제조, 플라스틱 제조 등 다양한 산업공정에서 원료로 이용되고 있으며, 이러한 이유로 농경지나 산업단지에서 배출될 확률이 높다 (Munnecke and Hsieh, 1974; Hallas and Alexander, 1983; Donlon et al., 1996).

모의에 필요한 4-nitrophenol의 감소율(decay rate)은 Bourquin et al. (1981)이 제시한 반감기(3.5일)를 1차 반응식($\ln(C/C_0) = -kt$)을 이용하여 계산한 수치를 적용하였으며, 추가적으로 4-nitrophenol이 보존성 물질이라고 가정한 모의를 수행하고 감소율 차이로 인한 기여율 변화를 비교하였다.

2.4 모형 입력값 및 연구방법

고도자료 및 토지피복에 대한 입력자료는 이전 연구 (Park and Kim, 2017; Park et al., 2017)와 동일하다. 기존에 활용된 지형 자료를 기반으로 하였다. 다만, 유량을 모의하기 위한 방식에는 변동이 있었는데, 이전 연구에서는 샘플링 당일로부터 1~2개월 전까지의 강수량을 활용하였다면, 이번 연구에서는 기존에 조

pp. 001-008

pp. 009-016

pp. 017-029

pp. 031-041

pp. 043-053

pp. 055-062

pp. 063-077

pp. 079-086

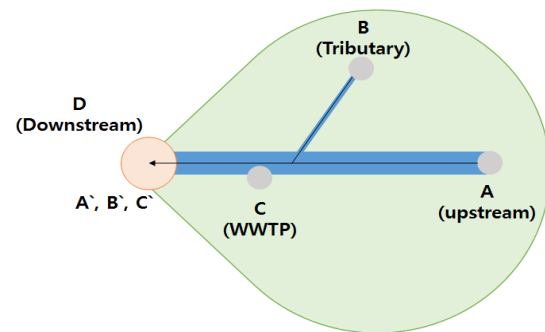
Table 1. Sampling sites and investigation year from 2013 to 2017

Section	Site	Type	2013	2014	2015	2016	2017
Section 1	Geumho1	Mainstream	O		O	O	O
	Limgo	Tributary					O
	Gochon	Tributary					O
	Sinlyeong	Tributary			O	O	O
	Bukan	Tributary					O
	Yeongchon	WWTP					O
	Daechang	Tributary					O
	chungtong	Tributary					O
Section 2	Geumho2	Mainstream	O		O	O	O
	Omok	Tributary	O		O	O	O
	Nam	Tributary	O		O	O	O
	Ansim	WWTP					O
Section 3	Geumho3	Mainstream	O	O	O	O	O
	Donghwa	Tributary		O	O	O	O
Section 4	Geumho4	Mainstream	O	O	O	O	O
	Sin	WWTP		O			O
	Sin	Tributary	O	O	O	O	O
Section 5 (Section 5-1)	Geumho5	Mainstream	O	O	O	O	O
	Palgeo	Tributary					O
	Bukbu	WWTP				O	O
	Dalseo	Tributary	O	O	O	O	O
	(Section 5-2)	Geumho5-1	Mainstream		O		
Leon		Tributary					O
(Section 5-3)	Geumho5-2	Mainstream		O			
	Geumho6	Mainstream	O	O	O	O	O
The number of the monitoring site			10	10	12	13	24

사되었던 지류의 유량을 반영하여 모의에 활용하였다 (Na et al., 2016). 금호강 유역의 하수처리장 방류량 자료는 시설용량 10,000 m³/day 이상의 하수처리장의 자료를 활용하였으며, 2016년부터는 자료가 공개되지 않아 이전 자료의 평균을 산정하여 모의에 반영하였다.

모의에 사용된 측정값은 Nakdong River Watershed Management Committee (2013, 2014, 2015, 2016, 2017)에서 조사한 자료를 활용하였다. 연도별로 모니터링 지점이 상이한데, 2014년의 경우 상류 지점은 조사하지 않고, 중·하류 지점을 중점적으로 모니터링을 수행하였고, 2017년에는 상류에 위치한 지류 지점들을 중점적으로 모니터링을 수행하였다 (Table 1).

잠재 오염원에 대한 영향 여부 및 기여율을 평가하기 위하여 본류 측정 지점 사이를 하나의 구간(section)으로 설정한 후 Fig. 2와 같은 방법으로 구간별 상류 지점과



Site	Input data (measured concentration)	Simulated Concentration at Downstream	Contamination Contribution
A	A	A'	A'/D
B	B	B'	B'/D
C	C	C'	C'/D
Potential Sources(PS)	-	PS=D-(A'+B'+C')	PS/D
D	D	-	1

Fig. 2. Scheme of the calculation of the contribution.



지류 지점들의 측정값을 입력값으로 하여 하류 지점을 모의하였다. 모의된 결과는 구간 하류 지점의 실측값과 비교하였으며, 실측값에서 모의값을 뺀 나머지를 잠재 오염원의 영향으로 간주하였다.

3. 결 과

3.1 유량 보정 및 부하량 산정 결과

2013년부터 2017년까지 모니터링 당시의 수계 환경을 반영하기 위하여 실제 금호강 유역에 위치한 5개

유량측정소의 유량과 거의 일치하도록 보정하였으며, 그 결과는 Fig. 3과 같다. 실측 유량과 모의된 유량의 유사도는 결정계수로 표현하였는데, 중류 지역의 실측 유량과 모의된 유량 사이에는 다소 차이가 발견되나, 결정계수는 모든 시기에서 0.85 이상으로 높게 나타나 실제 유량을 잘 반영한 것으로 판단된다.

본류 지점별 부하량은 유량 보정을 통해 모의된 각 본류 지점에 대한 모의유량과 각 지점별 실측 농도를 이용하여 산정하였으며, Table 2를 통해 상류에서 하류까지의 지점별 부하량 변화를 표현하였다. 일반적으로 상류에서 하류로 이동하면서 점점 증가하는 패턴을 보이는데,

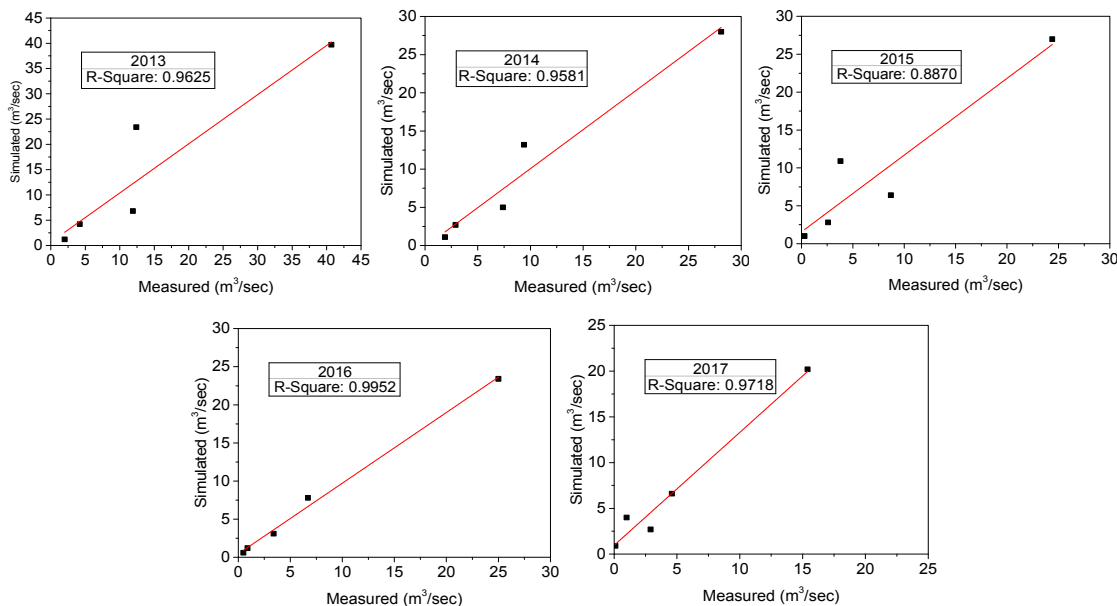


Fig. 3. Comparison each year between the measured and simulated flow rate.

Table 2. Measured concentrations and load at mainstream sites

Sites	2013		2014		2015		2016		2017	
	Conc. (ng/L)	Mass Loading (µg/sec)	Conc. (ng/L)	Mass Loading (µg/sec)	Conc. (ng/L)	Mass Loading (µg/sec)	Conc. (ng/L)	Mass Loading (µg/sec)	Conc. (ng/L)	Mass Loading (µg/sec)
Geumho1	79.5	201.3	-	-	0	0	15.5	3.9	26.4	26.7
Geumho2	21.8	264.4	-	-	24.3	297.3	19.2	180.7	40.1	373.8
Geumho3	16.7	408.3	61.8	1450.4	34.9	680.3	26.2	468.2	44.4	656.1
Geumho4	34.9	924.6	44.1	1105.0	29.8	620.7	39.4	761.3	44.8	722.4
Geumho5	40.3	1149.6	51.2	1350.2	51.3	1126.6	24.2	504.5	38.4	677.9
Geumho5-1	-	-	19.8	538.2	-	-	-	-	-	-
Geumho5-2	-	-	21.5	609.7	-	-	-	-	-	-
Geumho6	21.1	836.2	25.4	720.3	68.6	1761.0	16.6	394.6	38.2	816.0

Conc. : Nakdong River Watershed Management Committee (2013; 2014; 2015; 2016; 2017)

- : No data

특히 2015년부터 2017년까지는 금호강1 지점부터 금호강3 지점까지는 비교적 급격한 부하량 증가를 보이는 것을 확인하였다. 2013년의 경우 금호강1 지점에서 201.3 µg/sec 정도의 높은 부하량을 보였으며, 금호강2 지점에서부터 금호강4 지점까지 급격한 부하량 상승을 보였다. 부하량 증가는 금호강 5지점까지 계속되나 상류 지역에 비해 비교적 완만한 증가 현상을 보였으며, 이후 금호강6 지점까지는 오히려 감소하는 경향을 보였다. 이를 통해 금호강1~금호강5 지역까지는 지류와 주변 지역에서 본류로 4-nitrophenol이 유입될 수 있으나, 낙동강 합류 지역인 금호강5~금호강6 지역에는 4-nitrophenol의 유입이 거의 없을 것으로 추론할 수 있다.

3.2 구간별 기여율 산정 결과

구간 1 지역(금호강1~금호강2)에 대한 모의 결과는 Fig. 4와 같다. 2013년에 대하여 금호강2 지점을 기준으로 한 금호강1 지점의 기여율은 감소율 미적용 시 100%, 감소율 적용 시 78%로 대부분의 4-nitrophenol이 금호강1 지점에서 기인하는 것으로 나타났다. 이후 2015년부터 2017년까지의 금호강1 지점의 기여율은 감소율 미적용 시 0~10%, 감소율 적용 시 0~7%로 2013년에 비해 급격히 감소하였다. 대신 잠재 오염원의 기여율은 2015년 95%, 2016년 92~94%로 조사되었으며, 이 시기에 신령천 지점의 기여율은 2015년 5%, 2016년 4~5%로 나타났다. 2017년에는 임고천과 고촌천 등의 지류 지점들과 하수처리장 지점들이 추가되어 추가된 지점들의 총 기여율은 13~16%로 집계되어 2015년과 2016년의 잠재오염원 기여율 중 일부는 지류나 하수처리장에서 기인되는 것으로 추론할 수 있

다. 나머지 잠재 오염원의 기여율은 74~80%로 집계되었으며, 금호강1 지점의 기여율은 7~10% 정도로 모의되었다.

구간 1 지역은 구간의 길이가 길고 농경지와 축사 및 농공단지 등이 혼재하고, 금호강1, 임고천, 고촌천 지점 근처에는 골프장이 위치하는 등 다양한 오염원이 위치해 있다. Parathion, malathion, fenitrothion 등의 농약류는 토양에 침투한 후 미생물 분해로 인해 nitrophenol계 물질이 중간생성물로 생성될 수 있는데 (Hayatsu et al., 2000; Galeano-Diaz et al., 2000), 이로 인해 생성된 4-nitrophenol이 비점오염원의 형태로 수계에 유입될 가능성이 있다. 또한 Lee et al. (2008)의 연구에서도 농공단지 폐수처리시설에서 난분해성 물질이 분해되지 않고 배출수에 검출된 사례가 있으며, Liu and Wang (2013)의 연구를 참고하면, 축산계 항생물질 중 하나인 sulfamethazine의 AOP 분해 시 중간생성물로 검출되는데, 이로 보아 농공단지 및 근처 폐수처리장에서도 4-nitrophenol이 배출될 가능성이 있을 것으로 생각된다.

구간 2 지역(금호강2~금호강3)에 대한 모의 결과는 Fig. 5로 나타내었다. 2013년 모의 결과, 금호강3 지점에 대한 금호강2 지점의 기여율은 감소율 미적용 시 65%, 적용 시 57%이며, 오목천 지점의 기여율은 20~22%로 모의되어 이 시기에는 주로 상류 지역인 구간 1 지역에서 유입된 4-nitrophenol이 구간 2 지역까지 영향을 미치는 것으로 판단된다. 2015년부터 상류 지역의 영향은 감소하고, 잠재 오염원의 영향은 증가하는데, 금호강2 지점의 기여율은 2015년 38~44%, 2016년 34~39%, 2017년 49~51%이며, 잠재 오염원의 기여

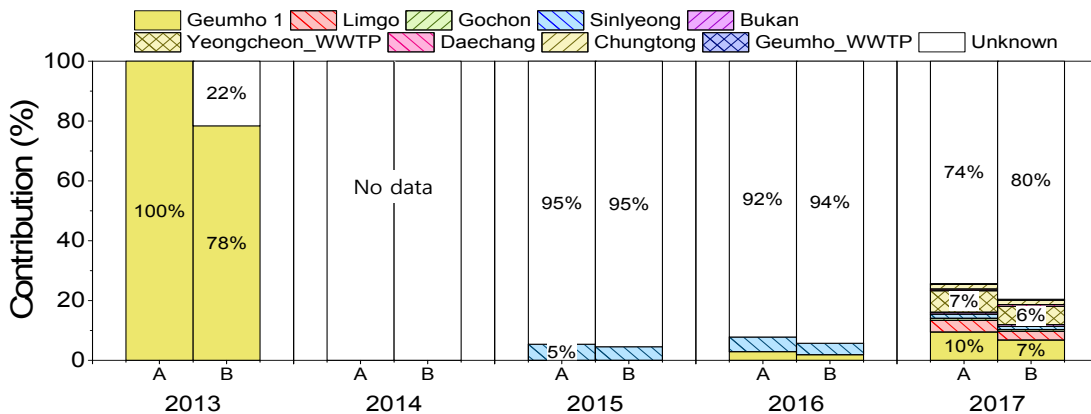


Fig. 4. Contribution rates with upstream, tributary, and WWTP sites in section 1 (A : half life 0 day, B : half life 3.5 day).



율은 2015년 41~48%, 2016년 54~60%, 2017년 41~49%로 모의되었다. 오목천과 남천 지점은 각각 공업단지 및 도시지역과 맞닿아 있어 4-nitrophenol의 유입이 우려되나, 2015년부터 2017년까지 기여율이 감소하는 추세를 보였다. 대신 구간 2 지역에서 잠재 오염원의 영향이 증가한 것에 대해서는 추후 대책이 필요할 것으로 보인다.

구간 3 지역(금호강3~금호강4)에 대한 모의 결과는 Fig. 6과 같다. 구간 3 지역부터 낙동강 합류점까지는 대구광역시를 지나므로, 도시지역에서의 4-nitrophenol의 유입 정도를 확인할 수 있다. 2013년 모의 결과 금호강4 지점의 측정농도에 대한 금호강3 지점의 기여율은 감소율 미적용 시 44%, 감소율 적용 시 42%이며, 잠재 오염원의 영향은 56~58%로 나타났다. 그러나 2014년과 2015년에는 금호강3 지점의 기여율이 100%로 나타났고, 2016년에는 57~61%로 감소하였으나, 2017년에는 다시 84~91%로 상승하였다.

구간 4 지역(금호강4~금호강5)에 대한 모의 결과는 Fig. 7로 나타내었다. 금호강5 지점에 대한 금호강4 지점의 기여율은 2013년 78~80%, 2014년 79~82%로 높고 잠재 오염원의 영향은 2013년 15~17%, 2014년 8~10%로 조사되었다. 그러나 2015년에는 금호강4 지점의 기여율은 53~55%, 잠재 오염원의 기여율은 42~44%로 잠재 오염원의 기여율이 이 시기에 급격히 상승하였다. 그러나 2016년 이후부터는 잠재 오염원의 영향은 거의 나타나지 않고 금호강4 지역의 기여율이 2016년 97%, 2017년 87%로 나타나 이 지역에서는 잠재 오염원의 영향이 거의 사라진 것으로 판단된다. 다만 신천 지점에서의 기여율이 5년간 2~10% 정도를 기록하여 이 지점에 대한 관리가 필요할 것으로 보이며, 2017년에 신천 하수처리장에서 8%의 기여율을 나타낸 것으로 보아 이 지점을 조사하지 않은 2016년까지의 잠재 오염원의 영향중에 신천 하수처리장의 기여율도 포함되어 있을 것으로 판단된다.

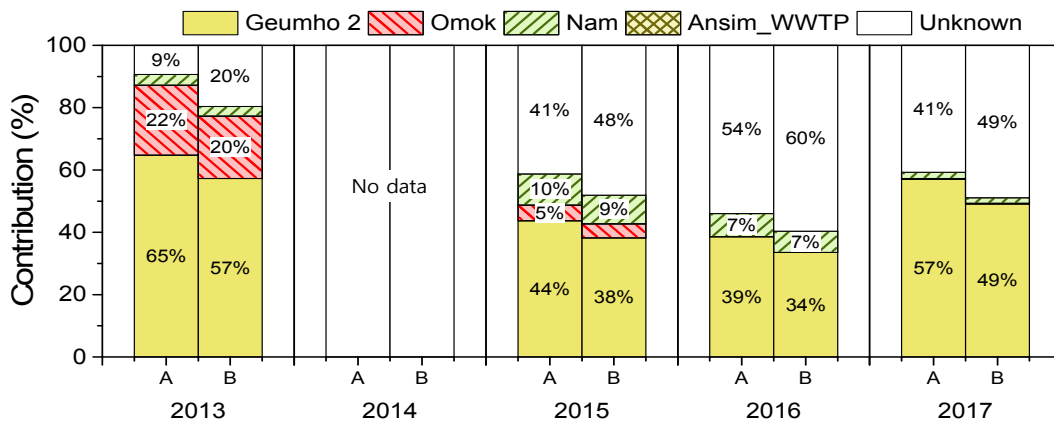


Fig. 5. Contribution rates with upstream, tributary, and WWTP sites in section 2 (A : half life 0 day, B : half life 3.5 day).

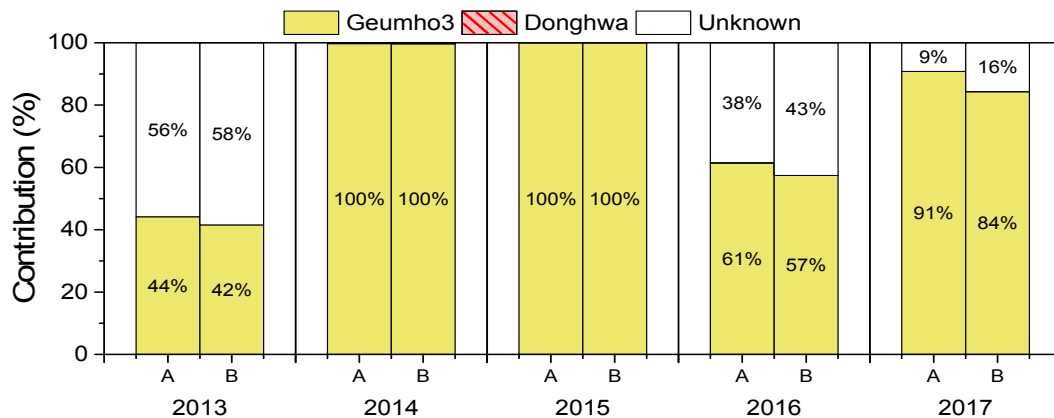


Fig. 6. Contribution rates with upstream and tributary sites in section 3 (A : half life 0 day, B : half life 3.5 day).

pp. 001-008

pp. 009-016

pp. 017-029

pp. 031-041

pp. 043-053

pp. 055-062

pp. 063-077

pp. 079-086

구간 5 지역(금호강5~금호강6)에 대한 모의 결과는 Fig. 8로 나타내었으며, 2014년에는 이 지역에 대한 세부 조사를 실시하여 따로 Fig. 9로 표현하였다. 금호강

6 지점에 대한 금호강5 지점의 기여율은 2013년에 92%로 높았으며, 2015년 58~64%, 2016년 67%, 2017년 74~79%로 비교적 감소하였으나, 전체적으로 상류

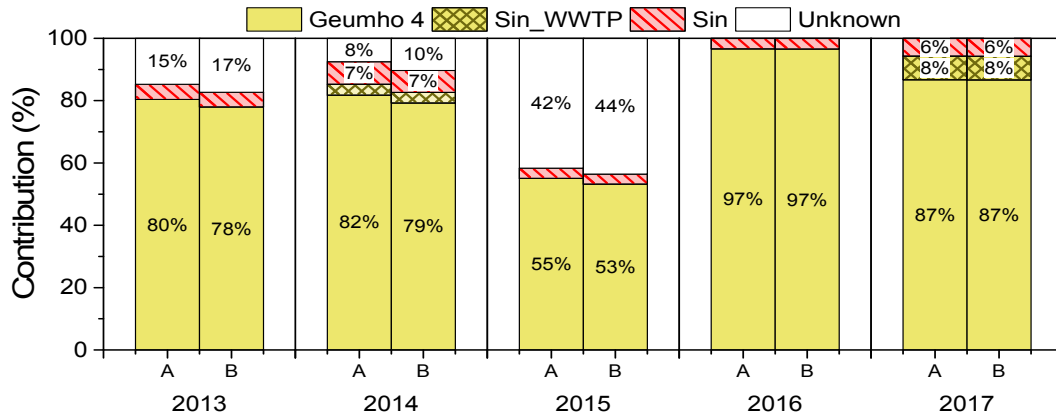


Fig. 7. Contribution rates with upstream, tributary, and WWTP sites in section 4 (A : half life 0 day, B : half life 3.5 day).

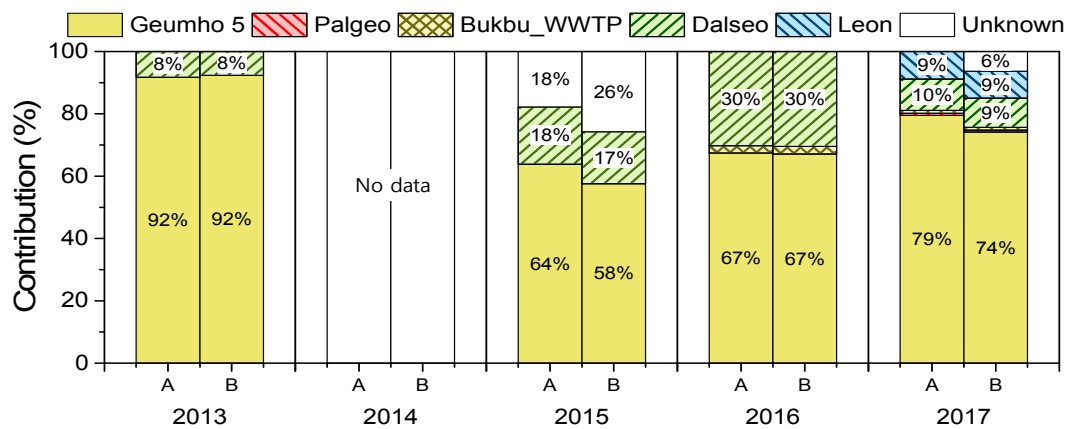


Fig. 8. Contribution rates with upstream, tributary, and WWTP sites in section 5 without 2014 (A : half life 0 day, B : half life 3.5 day).

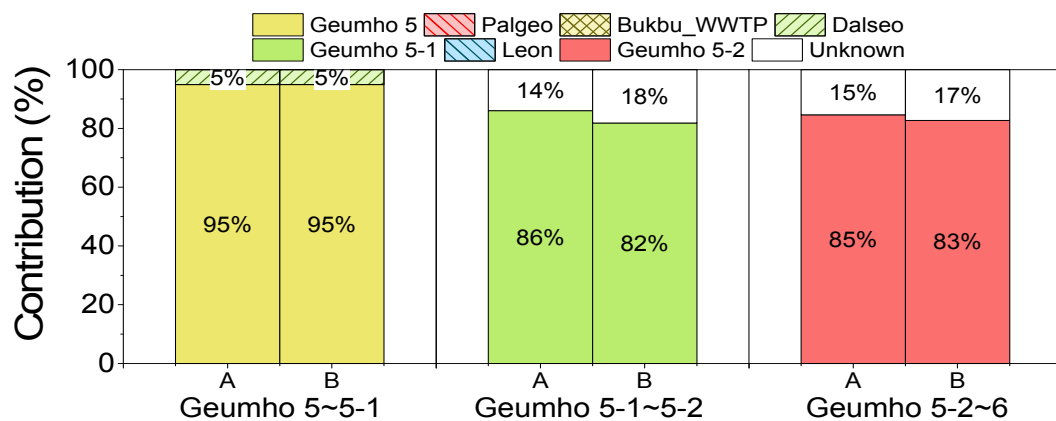


Fig. 9. Contribution rates with upstream, tributary, and WWTP sites in section 5 in 2014 (A : half life 0 day, B : half life 3.5 day).



지역의 영향이 큰 것으로 나타났다. 이에 2014년 모의 결과를 보면, 금호강5-1 지점의 농도에 대한 금호강5 지점의 기여율이 95%로 대다수를 차지하고, 금호강 5-2 지점과 금호강6 지점에 대한 금호강5-1 지점과 금호강5-2 지점의 기여율은 각각 82~86%, 83~85%로 나타났다. 잠재 오염원의 영향은 2014년 14~18%(구간 5-2)과 15~17%(구간 5-3), 2015년 18~26%, 2017년 0~6%로 나타났으며, 2013년과 2016년에는 잠재 오염원의 영향이 나타나지 않았다.

한편 금호강6 지점에 대한 지류인 달서천 지점에서의 기여율은, 2013년 8%, 2015년 17~18%, 2016년 30%, 2017년 9~10%이며 2014년 금호강5-1 지점에 대한 기여율이 5%로 모의되어, 본류 지점의 농도에 지속적으로 기여하는 것으로 나타났다. 달서천 지점에는 대규모 염색단지가 위치하고 있는데, nitrophenol류가 염료 제조에도 사용한다는 것을 고려해 보면 염색단지에서 4-nitrophenol이 유출되는 것으로 판단된다. 2017년에 조사한 이언천 지점에서도 금호강6 지점에 대한 기여율이 9%로 나타나 지속적인 관심이 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 2013년부터 2017년까지 금호강 유역에서 지속적으로 측정되고 있는 4-nitrophenol을 대상으로 유량이 일정하다고 가정한 조건에서 연별 농도 변화를 모의하고 기여율을 산정하였다.

(1) 본류 지점에 대한 부하량 변화를 보면, 상류에서부터 하류까지 부하량이 증가하는 추세를 보였다. 그러나 최상류 지점에서부터 중류 지점까지는 부하량이 급격히 증가하였다가 도시 지역인 하류 지역을 지나면서 증가율이 감소하였으며, 최하류 지점에 가까울수록 오히려 부하량이 감소하는 패턴을 보였다. 부하량 증감을 통해 4-nitrophenol의 유입은 주로 상류에서 발생하며, 낙동강 합류점으로 갈수록 유입이 감소하는 것으로 추정된다.

(2) 잠재 오염원의 기여율을 산정한 결과, 주로 상류 지역에서 잠재 오염원의 영향이 크며, 이 지역에서 배출된 4-nitrophenol이 하류 지역까지 지속적으로 영향을 주는 것으로 나타났다. 또한 대규모 공업단지와 도시 지역을 지나는 중·하류 지역의 경우 잠재 오염원의 영향은 크지 않아 이 지역에서는 비점오염원 등의

영향이 상류 지역에 비해 비교적 적은 것으로 나타났다. 상류 지역에는 농경지의 비중이 높고 골프장 등이 위치하므로 4-nitrophenol은 주로 농약류에 기인한 것으로 판단되나, 해당 지역에 대한 추가적인 조사가 필요할 것으로 판단된다.

(3) 지류 지점의 기여율을 비교해 보면, 주로 금호강 중·하류에 위치한 오목천과 남천, 신천, 달서천, 이언천의 영향이 비교적 큰 것으로 나타났다. 이들 지류는 상류에 공업단지가 위치하거나 도시 지역과 맞닿아 있는 공통점이 있으며, 금호강 중·하류에 위치하고 있다. 금호강 중·하류 지역에서는 잠재 오염원의 영향은 비교적 적지만, 상기 언급한 지류 지점에 대해서는 추가적인 관리가 필요할 것으로 판단된다.

사 사

본 논문은 낙동강유역환경청에서 지원하고 낙동강 물환경연구소 주관으로 수행된 연구 결과입니다[과제명 : 낙동강수계 지천중심 잠정관리 유해물질 및 오염경로 조사]. 또한 본 논문은 BK21 플러스 MADEC 인재양성사업단의 지원을 받아 작성되었습니다.

References

Bourquin A.W., Spain J.C. and Pritchard P.H. (1981). "Microbial degradation of xenobiotic compounds", *Conference of Environmental Toxicology*, 3-5 November, 1981, Air Force Aerospace Medical Laboratory, Ohio, USA, 354-369.

Brunner, P. and Simmons, C.T. (2012). HydroGeoSphere: A fully integrated, physically based hydrological model, *Ground Water*, 50(2), 170-176.

Cheng, W.P. and Jia, Y. (2010). Identification of contaminant point source in surface waters based on backward location probability density function method, *Adv. Water Resour.*, 33(4), 397-410.

Donlon, B.A., Razo-Flores, G., Lettinga, E., and Field, J.A. (1996). Continuous detoxification, transformation, and degradation of nitrophenols in upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors, *Biotechnol. Bioeng.*, 51(4), 439-449.

El Badia, A., Ha-Duong, T. and Hamdi, A. (2005). Identification of a point source in a linear advection-dispersion-reaction equation; application to a pollution source problem, 2005 IOP Publishing Ltd Inverse Problems, 21(3).

pp. 001-008
pp. 009-016
pp. 017-029
pp. 031-041
pp. 043-053
pp. 055-062
pp. 063-077
pp. 079-086

- Frei, S., Lischeid, G. and Fleckenstein, J.H. (2010). Effects of micro-topography on surface-subsurface exchange and runoff generation in a virtual riparian wetland — A modeling study, *Adv. Water Resour.*, 33(11), 1388-1401.
- Galeano-Diaz, T., Guiverteau-Cabanillas, A., Mora-Diez, N., Parrilla-Vazquez, P. and Salinas-Lopez, F. (2000). Rapid and sensitive determination of 4-nitrophenol, 3-methyl-4-nitrophenol, 4,6-dinitro-o-cresol, parathion-methyl, fenitrothion, and parathion-ethyl by liquid chromatography with electrochemical detection, *J. Agric. Food Chem.*, 48, 4508-4513.
- Guan, J., Mok, C.M. and Yeung, A.T. (2014). Integrated analysis framework for predicting surface runoff, infiltration, and slope stability, *Geo-Congress 2014 Tech. Pap.*, 2588-2599.
- Hallas, L.E. and Alexander, M. (1983). Microbial transformation of nitroaromatic compounds in sewage effluent, *App. Environ. Microbiol.*, 46(1), 1234-1241.
- Hayatsu, M., Hirano, M. and Tokuda, S. (2000). Involvement of two plasmids in fenitrothion degradation by *Burkholderia* sp. Strain NF100, *App. Environ. Microbiol.*, 66(4), 1737-1740.
- Kang, D.H., So, Y.H., Kim, I.K., Oh, S.B., Kim, S. and Kim, B.W. (2017). Groundwater flow and water budget analyses using HydroGeoSphere model at the facility agricultural complex, *J. Eng. Geol.*, 27(3), 313-322.
- Katopodes, N.D. and Piasecki, M. (1996). Site and size optimization of contaminant sources in surface water systems, *J. Environ. Eng.*, 122(10), 917-923.
- Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources(KIGAM). (2011). Application of analysis technique and modeling for coupled groundwater-surface water flow system, KIGAM, Daejeon, Korea.
- Lee, M.H., Choi, I.C. and Han, S.K. (2008). Toxic assessment on effluents of argo/industrial wastewater treatment plants in Jeonnam using chemical and biological method, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf.*, 14(4), 267-273.
- Li, Z., Mao, X., Li, T.S. and Zhang, S. (2016). Estimation of river pollution source using the space-time radial basis collocation method, *Adv. Water Resour.*, 88, 68-79.
- Liu, C. and Ball, W.P. (1999). Application of inverse methods to contaminant source identification from aquitard diffusion profiles at Dover AFB, Delaware, *Water Resour. Res.*, 35(7), 1975-1985.
- Liu, Y. and Wang, J. (2013). Degradation of sulfamethazine by gamma irradiation in the presence of hydrogen peroxide, *J. Hazard. Mater.*, 250-251, 99-105.
- Mahar, P.S. and Datta, B. (2001). Optimal identification of ground-water pollution sources and parameter estimation, *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 127(1), 20-29.
- Munnecke, D.M. and Heish, D.P.H. (1974). Microbial decontamination of parathion and p-Nitrophenol in aqueous media, *Appl. Microbiol.*, 28(2), 212-217.
- Mustapha, H., Dimitrakopoulos, R., Graf, T. and Firoozabadi, A. (2011). An efficient method for discretizing 3D fractured media for subsurface flow and transport simulations, *Int. J. Numer. Methods Fluids*, 67(5), 651-670.
- Na, S., Kwon, H., Kim, G.H., Shin, D. and Im, T.H. (2016). Analysis of specific contaminated status and pollutant loads contribution rate of the tributaries in Gumho and Nam River basin, *J. Wet. Res.*, 18(4), 363-377.
- Nakdong River Watershed Management Committee. (2013). A survey on the monitoring of potentially hazardous compounds and contamination routes in tributary of the Nakdong river system-1st annual report, Nakdong River Watershed Management Committee, Changwon, Korea, 155.
- Nakdong River Watershed Management Committee. (2014). A survey on the monitoring of potentially hazardous compounds and contamination routes in tributary of the Nakdong river system-2nd annual report, Nakdong River Watershed Management Committee, Changwon, Korea, 137-138.
- Nakdong River Watershed Management Committee. (2015). A survey on the monitoring of potentially hazardous compounds and contamination routes in tributary of the Nakdong river system-3rd annual report, Nakdong River Watershed Management Committee, Changwon, Korea, 145-146.
- Nakdong River Watershed Management Committee. (2016). A survey on the monitoring of potentially hazardous compounds and contamination routes in tributary of the Nakdong river system-4th annual report, Nakdong River Watershed Management Committee, Changwon, Korea, 122-123.
- Nakdong River Watershed Management Committee. (2017). A survey on the monitoring of potentially hazardous compounds and contamination routes in tributary of the Nakdong river system-5th annual report, Nakdong River Watershed Management Committee, Changwon, Korea, 78-79.
- Noh, O.S. (2010). Surface water-subsurface water flow modeling, Master Thesis, Kangwon National University, Korea.
- Park, K.D. and Kim, I.K. (2017). Study on the simulation of contamination route and estimation of the pollution sources



of DNOC using a numerical model, *J. Korean Soc. Water and Wastewater*, 31(1), 29-37.

Park, K.D., Shin, D.S., Yang, D.S., Lee, I., Lim, Y.K. and Kim, I.K. (2017). Simulation of the route of 4-Nitrophenol in the Geumho river and analysis of the impact of potential contamination sources using a numerical model, *J. Environ. Sci. Int.*, 26(2), 211-220.

Partington, D., Brunner, P., Frei, S., Simmons, C.T., Werner, A.D., Therrien, R., Maier, H.R., Dandy, G.C. and Fleckenstein, J.H. (2013). Interpreting streamflow generation mechanisms from integrated surface-subsurface flow models of a riparian wetland and catchment, *Water Resour. Res.*, 49(9), 5501-5519.

Piasecki, M. and Katopodes, N.D. (1997). Control of contaminant releases in rivers. II: optimal design, *J. Hydraul. Eng.*, 123(6), 493-503.

Rasoulzadeh, A. and Ghoorabjiri, M.H. (2014). Comparing hydraulic properties of different forest floors, *Hydrol. Process.*, 28, 5122-5130.

Yin, Y. (2009). Uncertainty analysis and the identification of the contaminant transport and source parameters for a computationally intensive groundwater simulation, Ph.D Thesis, the university of waterloo, Canada.

Yin, Y., Sykes, J.F. and Normani, S.D. (2015). Impacts of spatial and temporal recharge on field-scale contaminant transport model calibration, *J. Hydrol.*, 527, 77-87.

Zhang, S. and Xin, X. (2016). Pollutant source identification model for water pollution incidents in small straight rivers based on genetic algorithm, *Appl. Water Sci.*, 7(4), 1-9.

pp. 001-008	
pp. 009-016	
pp. 017-029	
pp. 031-041	
pp. 043-053	
pp. 055-062	
pp. 063-077	
pp. 079-086	