

ORIGINAL ARTICLE

수치모형을 이용한 금호강 수계 내 4-Nitrophenol의 거동 모의 및 잠재 오염원의 영향 분석

박경덕 · 신동석¹⁾ · 양득석¹⁾ · 이인정¹⁾ · 임영경¹⁾ · 김일규*

부경대학교 환경공학과, ¹⁾국립환경과학원 낙동강물환경연구소

Simulation of the Route of 4-Nitrophenol in the Geumho River and Analysis of the Impact of Potential Contamination Sources using a Numerical Model

Kyeong-Deok Park, Dong-Seok Shin¹⁾, Duk-Seok Yang¹⁾, Injung Lee¹⁾, Young-Kyong Lim¹⁾, Il-Kyu Kim*

Department of Environmental Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

¹⁾Nakdong River Environment Research Center, Goryeong 40103, Korea

Abstract

For areas with the diverse contamination sources, the change of 4-nitrophenol contamination and impact of potential contamination sources have been evaluated using monitoring data and a numerical model (HydroGeoSphere). The model considered several parameters including land cover, precipitation, and flow rate. And, the model has been performed to investigate the effect of decay rate of 4-nitrophenol. The results of the simulations showed that the influence on 4-nitrophenol in downstream was mainly greater than that in upstream, and the tributaries did not significantly affect the mainstream because of their low flow rates. In addition, the effect of contamination sources was simulated for each section, then the measured data were higher than the corresponding simulated data in most sections of the Geumho river. In particular, the impact of the potential contamination sources in the upstream area was much higher than that in the other area, thus more monitoring data for the upstream area is required.

Key words : HydroGeoSphere, Water quality modeling, Contamination source estimation, Pollution load, Contribution rate

1. 서론

과학의 발달로 인해 개발된 합성유기물질은 인류의 생활에 없어서는 안 될 중요한 물질이다. 그러나 이들 물질은 수중에 미량으로 유입되어도 수중 생물들

에게 독성과 생물 농축성을 일으키는 유해물질로 작용한다. 그러므로 이러한 유해물질이 자연계로 유입되는 것을 최대한 방지하려는 노력이 필요하다. 국내에서는 지속적인 모니터링을 통하여 유해물질의 유입 여부를 관찰하는 한편, 추가적인 모니터링을 통하여

Received 23 November, 2016; Revised 17 January, 2017;

Accepted 24 January, 2017

*Corresponding author: Il-Kyu Kim, Department of Environmental Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea
Phone : +82-51-629-6528
E-mail : ikkim@pknu.ac.kr

The Korean Environmental Sciences Society. 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.

오염원을 추정하여 유해물질의 유출을 사전적으로 예방하고자 하는 연구도 진행되고 있다.

그러나 모니터링만으로 오염원을 파악하기에는 많은 인력과 시간이 소요된다. 그리고 모니터링의 경우 결과값은 농도로 표현되는데, 농도만으로는 유량의 변화를 고려하기 힘든 단점이 있다. 그러므로 이러한 단점을 보완하기 위하여 모니터링과 함께 수치적인 해석이 요구된다.

수치모형을 이용한 모의는 보존성 물질이나 영양염류를 모의한 사례가 대부분이나, 유해물질의 거동을 분석한 연구도 활발히 진행되고 있다. Luo and Zhang(2009)은 SWAT을 이용하여 캘리포니아 지역의 농경지역을 대상으로 비점오염원을 모의하였으며, Laroche et al.(1996)은 HSPF를 이용하여 캐나다 퀘벡 주의 농경지 비점오염원을 대상으로 모의한 사례가 있다. Branger et al.(2009)은 PESTDRAIN을 이용하여 프랑스 서북 지역을 대상으로 한 배수로 지역의 농약류 거동을 모의하였다. Huber et al.(2000)은 GIS와 PELMO를 이용하여 과수원, 농경지 등이 혼재해 있는 지역에서의 농약류 유출을 모의하였다. 그러나 대부분의 연구는 주로 농약류를 대상으로 하여 오염원이 다양하지 않고, 특히 금호강 유역과 같이 다양한 오염원이 산재해 있는 지역을 대상으로 한 연구는 미미한 실정이다.

본 연구에서는 금호강 유역을 대상으로 하였으며, 대상 물질은 금호강 유역에서 지속적으로 배출되고 있는 4-nitrophenol로 선정하였다. 모의는 4-nitrophenol이 일정한 농도로 배출된다고 가정하였을 경우 대상 물질이 흐름에 따라 어떤 농도분포를 보이며, 모의된 결과와 실측치와의 비교를 통하여 금호강 유역에 분포하고 있는 잠재 오염원의 영향을 추측하였다. 본 연구에서는 2-D 지표수 영역에 대하여 물 흐름과 물질 거동을 표현할 수 있는 수치모형(HydroGeoSphere, HGS)을 이용하여 이미 조사된 자료를 토대로 물질 거동과 오염원의 영향을 분석하였다. 본 연구를 통하여 다양한 오염원이 산재해 있을 경우 잠재 오염원을 추정하고, 이를 통하여 추가적인 모니터링 수행에 기여하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1. 대상 유역

금호강은 낙동강의 지류 중 하나로, 포항시 북구에서 시작하여 영천시, 경산시를 지나 대구광역시 성서에서 낙동강과 합류한다. 유역 면적은 2,092.42 km², 하천 총 길이는 6,178.35 km이다(WAMIS, 2015).

금호강은 본래 식수와 생활용수의 공급처로서 하천유지용수가 풍부하고 자정작용이 탁월하였으나, 급격한 산업화로 인한 다량의 폐수 유입과 영천댐 축조로 인한 유량 감소로 인하여 수질이 급격히 악화되었으며, 1991년 폐놀 유출 사고가 발생하기도 하였다. 이에 하수처리장 건설과 정기적인 수질 측정으로 수질이 어느 정도 회복되었으나, 상류부터 하류까지 금호강 수질에 영향을 미칠 수 있는 다양한 오염원이 존재하므로 이 지역에 대한 지속적인 관리가 필요하다.

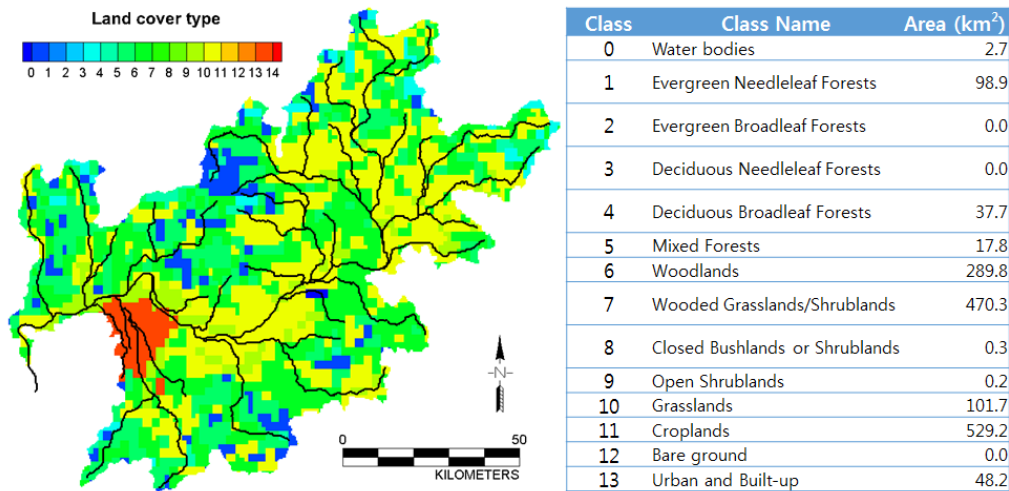
2.2. 모형 선정 및 적용

HydroGeoSphere (HGS)는 지하수 모형인 FRAC3DVS에서 지표수 영역까지 확장, 개발한 모형으로, 2-D 지표수 영역과 3-D 지하수 영역 및 두 영역 사이의 상호작용까지 표현 가능하도록 설계되었다(Brunner and Simmons, 2012). HGS는 정상 상태와 같은 간단한 물 흐름뿐만 아니라 다양한 포화도를 가지는 지하 영역이나 지표수-지하수 영역을 통합적으로 모의가 가능하며, 지역 규모에 대하여 물질 거동과 열 이동을 모의할 수 있다(Brunner and Simmons, 2012). 그리고 지표수 흐름에 영향을 주는 장애물과 지하수 영역의 포화도, 증발산량과 같은 기후 요소를 적용할 수 있다(Panday and Huyakorn, 2004). 이러한 이유로 북미와 유럽 등지에서 HGS를 이용한 물 흐름과 물질 거동을 모의한 사례가 꾸준히 늘고 있다.

Frei et al.(2010)과 Partington et al.(2013)은 습지를 대상으로 지표수 영역과 지하수 영역 사이의 상호작용을 모의하였다. Yin et al.(2015)은 지하수계 내의 TCE를 대상으로 오염 거동을 모의하였으며, Kourakos and Harter(2014)는 HGS와 algebraic multigrid를 이용하여 지하수계 내의 질산염 거동을 모의하고 비점오염원을 추정하였다. 우리나라에서는 KIGAM(2011)에서 제주도 지역을 대상으로 지하수 인공함양 실용화

Table 1. Friction factors of various land cover

Land cover	Water	Forests	Shrublands	Grasslands	Croplands	Barren land	Urban
Friction factor	0.001	0.1	0.01	0.04	0.04	0.008	0.002

**Fig. 1.** Land cover in the Geumho river watershed.

평가를 위하여 HGS를 이용한 사례가 있다.

본 연구에서는 지표수 영역만을 고려하여 정상 상태에서 오염물질이 지속적으로 유출되는 경우 4-nitrophenol의 거동과 오염 기여율을 평가하였다.

2.3. 입력자료 구성

금호강 유역을 표현하고 물 흐름을 모의하는 데 필요한 지형자료는 150 m 해상도의 DEM 자료를 사용하였으며, 고도자료와 좌표를 추출한 후 유한요소망을 구성하였다. 금호강 유역을 표현하는 데 사용된 절점(node)의 수는 73,877개이다. 토지피복도 자료는 GLCF(2015)에서 제공하는 1 km 해상도의 AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer)를 이용하였다(Fig. 1).

물 흐름을 모의하기 위해서는 토지피복도에 따라 다른 마찰 계수(friction factor)를 지정하여 물의 지표 유출(run-off) 정도를 조정하였으며(McCuen, 2004), 지정된 마찰 계수는 Table 1과 같다.

금호강 유역의 유량을 모의하기 위해서는 금호강

유역의 강수량 자료와 유역에 위치하는 하수처리장 배출량 자료를 이용하였다. 강수량 자료는 금호강 유역에 위치하는 강수량 측정소의 샘플링 당일부터 1 ~ 2개월까지의 자료를 WAMIS(2015)를 통해 수집, 활용하였으며, 하수처리장 자료는 시설용량 10,000 m³/day 이상의 규모가 큰 하수처리장의 자료를 활용하여 샘플링 당시 금호강 유역 내에 있는 유량 측정소 5지점에서 측정된 유량과 모두 근접하도록 모의하였다(MOE, 2014).

2.4. 대상 유해물질 조사

본 연구에서 모의되는 대상 유해물질은 금호강 유역에 지속적으로 검출되는 물질인 4-nitrophenol을 선정하였다(Nakdong River Watershed Management Committee, 2015). 4-nitrophenol은 농약류나 염료, 플라스틱 제조, 고무화학품 등의 생산 공정에 원료로 사용되며, 이러한 이유로 농경지나 산업단지의 방류수에 검출될 가능성이 있다(Munnecke and Hsieh, 1974; Hallas and Alexander, 1983; Donlon et al.,

Table 2. Comparison between the measured and the simulated flow rate

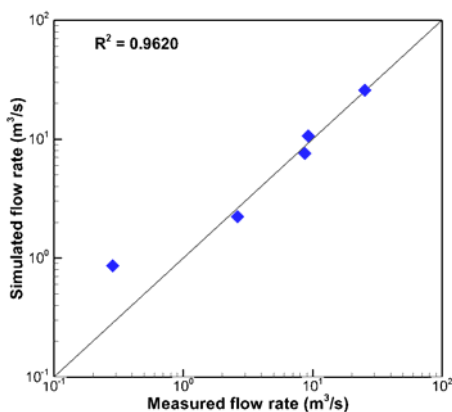
Observation station	Danpo-gyo (Upstream)	Geumho (Upstream)	Apryang (Tributary)	Dongho (Midstream)	Seongseo (Downstream)
Measured	2.63	8.72	0.285	9.29	25.37
Simulated	2.22	7.56	0.86	10.64	25.67

1996). 4-nitrophenol의 반감기는 일반적인 강에서의 반감기(3.2일)를 적용하였으며, 1차식 ($\ln(C/C_0) = -kt$)을 이용하여 감소율(decay rate)을 계산하였다(ATSDR, 1992). 본 연구에서는 4-nitrophenol을 감소율을 고려하지 않은 보존성 물질로 가정할 때와 문헌조사를 통해 구한 감소율을 적용할 경우로 나누어 모의를 진행하였다.

3. 연구 결과

3.1. 유량 보정 결과

2015년의 강수량 자료를 토대로 금호강 유역에 적용되는 강수량을 조정하여 금호강 유역의 유량을 샘플링 당시의 유량과 거의 일치하도록 보정하였다. 이때 입력값으로 사용한 상류 지역의 강수량은 3.28 mm, 나머지 지역의 강수량은 0.65 mm으로 설정하였으며, 실제 강수량과 약 1 mm 정도의 차이를 보였고, 이러한 방법으로 구한 유량은 실제 유량과 비슷하게 모의되었다(Fig. 2, Table 2).

**Fig. 2.** Comparison between the measured and simulated flow rate.

3.2. 상류 측정 결과를 이용한 4-nitrophenol 농도 변화 모의

상류에서 배출된 대상 유해물질이 하류로 이동할수록 어떤 농도분포를 보이며, 하류 농도에 어느 정도 기여하는지 알아보기 위하여 상류 측정값을 단일 오염원으로 가정하였을 경우 하류로의 이동에 따라 변하는 유해물질의 농도변화와 예상 부하량을 모의하였다. 모의는 보존성 물질로 가정한 모의와 감소율을 적용한 모의로 구분하여 감소율로 인한 농도 변화와 부하량의 변화를 비교하였으며, 그 결과는 Table 3, Table 4로 표현하였다.

모의 결과, 공통적으로 감소율을 적용하지 않았을 때는 부하량이 하류로 이동하여 희석되더라도 그 값이 거의 변하지 않는 것을 확인할 수 있다. 그리고 감소율을 적용한 경우는 부하량이 서서히 감소하는 패턴을 보이고 있다. 신령천, 오목천, 남천, 신천 등의 지류는 합류 전에 비해 합류 후 그 농도가 약 10배 이상 감소하여 본류와 농도가 비슷하더라도 낮은 유량 때문에 고농도가 아닌 경우를 제외하고는 본류에 큰 영향을 미치지 못할 것으로 판단된다. 그러나 금호강2 지점과 같은 본류 지점을 모의한 결과 측정된 농도가 하류로 갈수록 큰 변화를 보이지 않는 것으로 모의되었다. 이를 통해 하류 지점의 농도는 잠재 오염원의 영향이 없을 경우 대부분 상류 지점의 농도에 큰 영향을 받을 것으로 판단되며, 본류 농도에 대한 지류 지점의 기여도는 지류 지점의 농도와 함께 지류의 규모 또한 중요한 요소로 작용할 수 있을 것으로 추정된다.

3.3. 구간별 오염 기여도 산정과 오염원 영향 평가

잠재적인 오염원의 존재 여부를 판단하기 위하여 본류 측정 지점 사이를 하나의 구간으로 설정한 후, 구간의 본류 상류 지점과 지류 지점의 측정농도를 입력하여 하류 지점을 모의한 후 이를 실측 자료와 비교

Table 3. Change of 4-nitrophenol concentration and load using one of the sampling sites according to the flow in 2015 (mainstream)

Input data (Conc.)		Simulated result				
		Geumho2	Geumho3	Geumho4	Geumho5	Geumho6
Geumho2 (24.3 ng/L)	Decay rate : 0	Conc. (ng/L)	17.633	16.088	10.848	8.620
		Load (ug/sec)	221.219	221.242	221.284	221.287
	Decay rate : 0.2/day	Conc. (ng/L)	14.981	12.557	8.165	5.857
		Load (ug/sec)	187.947	172.679	166.538	150.360
Geumho3 (34.9 ng/L)	Decay rate : 0	Conc. (ng/L)		31.820	21.457	17.049
		Load (ug/sec)		437.585	437.667	437.672
	Decay rate : 0.2/day	Conc. (ng/L)		29.235	19.009	13.637
		Load (ug/sec)		402.037	387.740	350.074
Geumho4 (29.8 ng/L)	Decay rate : 0	Conc. (ng/L)			20.087	15.960
		Load (ug/sec)			409.723	409.728
	Decay rate : 0.2/day	Conc. (ng/L)			19.369	13.895
		Load (ug/sec)			395.078	356.699
Geumho5 (51.3 ng/L)	Decay rate : 0	Conc. (ng/L)				40.663
		Load (ug/sec)				1043.883
	Decay rate : 0.2/day	Conc. (ng/L)				36.713
		Load (ug/sec)				942.467

하였다. 하류 측정지점의 모의는 감소율을 적용하지 않은 경우와 문헌 연구를 통하여 구한 최대 감소율을 적용한 경우로 나누어 모의하였다.

금호강1 지점과 신령천 지점의 측정농도를 입력값으로 하여 금호강2 지점의 농도를 모의한 후 이를 금호강2 지점의 실측값과 비교해 본 결과, 모의값이 측정값의 약 4% 정도만을 차지하였다. 금호강1 지점은 4-nitrophenol이 검출되지 않았으며, 신령천 지점에서

측정된 4-nitrophenol이 금호강2 지점으로 이동하면서 지류 등에 의한 희석효과로 인한 것으로 판단된다. 또한, 금호강2 지점의 측정농도는 24.3 ng/L로 상류 측정값에 비해 높은 농도를 보이고 있으므로, 구간 1 (금호강1 ~ 금호강2)에서는 잠재적인 오염원이 존재하며, 금호강2 지점의 실측값의 대부분을 차지하는 것으로 추정된다(Fig. 3).

구간 1 지역은 대부분 농경지와 초지가 존재하며

Table 4. Change of 4-nitrophenol concentration and load using one of the sampling sites according to the flow in 2015 (tributaries)

Input data (Conc.)		Simulated result					
		Geumho2	Geumho3	Geumho4	Geumho5	Geumho6	
Silyeong (8.5 ng/L)	Decay rate : 0	Conc. (ng/L)	1.025	0.744	0.679	0.458	0.384
		Load (ug/sec)	9.334	9.332	9.333	9.334	9.335
	Decay rate : 0.2/day	Conc. (ng/L)	0.833	0.514	0.431	0.280	0.201
		Load (ug/sec)	7.592	6.449	5.925	5.714	5.159
Omok (34.1 ng/L)	Decay rate : 0	Conc. (ng/L)		2.590	2.363	1.593	1.266
		Load (ug/sec)		32.490	32.493	32.499	32.499
	Decay rate : 0.2/day	Conc. (ng/L)		2.292	1.921	1.249	0.896
		Load (ug/sec)		28.759	26.423	25.483	23.007
Nam (32.4 ng/L)	Decay rate : 0	Conc. (ng/L)		2.782	2.539	1.712	1.360
		Load (ug/sec)		34.907	34.910	34.917	34.917
	Decay rate : 0.2/day	Conc. (ng/L)		2.512	2.105	1.369	0.982
		Load (ug/sec)		31.514	28.954	27.925	25.212
Donghwa (8.9 ng/L)	Decay rate : 0	Conc. (ng/L)			0.476	0.321	0.255
		Load (ug/sec)			6.542	6.544	6.544
	Decay rate : 0.2/day	Conc. (ng/L)			0.471	0.306	0.220
		Load (ug/sec)			6.475	6.245	5.638
Sin (29.4 ng/L)	Decay rate : 0	Conc. (ng/L)				1.871	1.486
		Load (ug/sec)				38.157	38.157
	Decay rate : 0.2/day	Conc. (ng/L)				1.818	1.304
		Load (ug/sec)				37.090	33.487

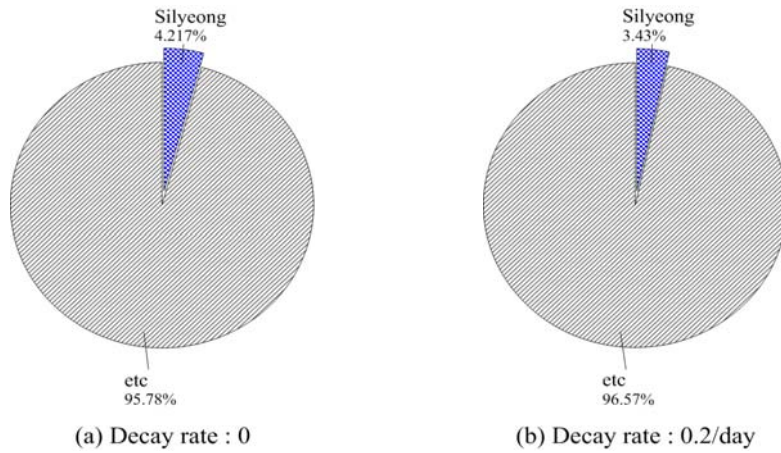


Fig. 3. Contribution rate with Geumho1 and Silyeong sampling sites for Geumho2.

골프장과 농공단지가 타 구간에 비해 많은 편이다. 골프장에서 많이 사용되는 농약 중 하나인 fenitrothion은 토양 미생물에 의해 분해되며 4-nitrophenol이 중간 생성물의 형태로 생성된다(Hayatsu et al., 2000). 그러므로 주변에 농경지가 많아 구간 1 지역의 오염원은 골프장이나 주변 농경지로 추정할 수 있으며, 농공단지나 농공단지에서 배출되는 폐수를 처리하는 시설에서 난분해성 물질들이 배출되는 사례가 있어 농공단지에 대한 영향도 고려해야 할 것으로 생각된다(Lee et al., 2008).

금호강2 지점과 오목천, 남천의 측정농도를 입력값으로 하여 금호강3 지점의 농도를 모의한 후 실측값과

비교한 결과, 모의값은 실측값의 57 ~ 66% 정도의 비중을 차지하였다(Fig. 4). 금호강3 지점의 실측값 중 금호강2 지점의 영향은 43 ~ 50% 정도로 거의 절반을 차지하며, 오목천과 남천 지점은 약 7%의 비중을 차지하는 것으로 모의되었다. 오목천 지점과 남천 지점의 실측값은 금호강2 지점에 비해 높으나, 낮은 유량으로 인하여 금호강2 지점에 비해 그 영향이 적은 것으로 판단된다. 이 지역에 위치한 잠재오염원의 영향은 34 ~ 43% 정도로 산정되었다.

구간 2(금호강2 ~ 금호강3) 지역은 도심지역으로 가는 중간 지역으로 농경지와 도시 지역이 혼재해 있다. 금호강3 지점에서 검출된 4-nitrophenol의 절반

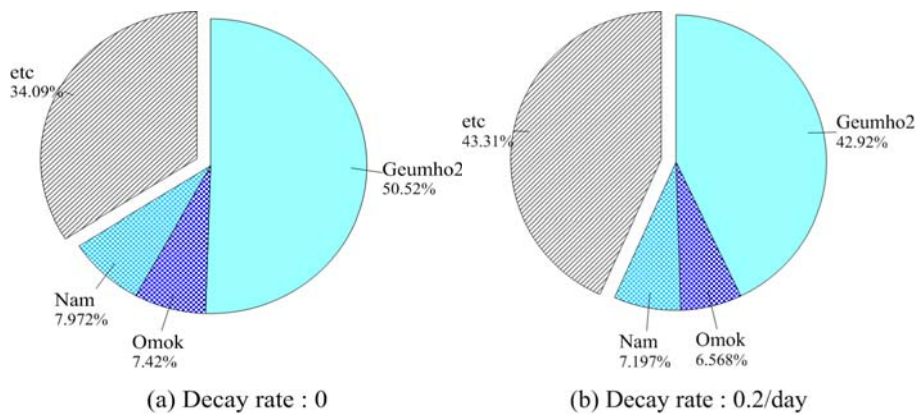


Fig. 4. Contribution rate with Geumho2, Omok, and Nam sampling sites for Geumho3.

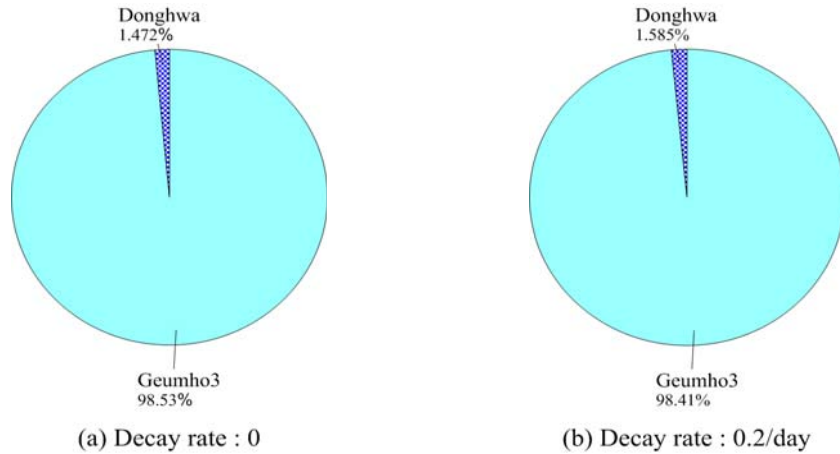


Fig. 5. Contribution rate with Geumho3 and Dongghwa sampling sites for Geumho4.

정도는 상류 지역의 영향으로 보이며, 나머지는 본류 주변에 위치하는 농경지의 농약류나 공단 등의 영향으로 추정된다. 오목천에는 작은 공업단지들이 위치하고 있으며, 남천 하류에는 하수처리장이 위치하고 있어 이곳에서도 4-nitrophenol이 소량 배출될 가능성이 있을 것으로 보인다.

금호강3 지점과 동화천 지점의 실측값을 입력값으로 하여 금호강4 지점의 농도를 모의한 결과 실측값과 거의 일치하는 결과를 보였다(Fig. 5). 구간 3(금호강3 ~ 금호강4) 지역은 4-nitrophenol에 대하여 잠재오염원의 영향은 거의 없는 것으로 추정되며, 이 지역의 경우 상류 지역의 영향을 크게 받으므로, 상류 지역에서

의 4-nitrophenol 관리를 강화해야 할 것으로 보인다.

금호강4 지점과 신천 지점의 실측값을 입력값으로 하여 금호강5 지점의 농도를 모의한 결과, 모의값이 실측값의 약 40% 정도를 차지하였다(Fig. 6). 그 중 금호강4 지점의 기여율은 약 38% 정도를 차지하였으며, 신천 지점은 3.5% 정도 기여하는 것으로 모의되었다. 구간 4(금호강4 ~ 금호강5)지역은 도시 지역과 대규모 공업단지를 지나며, 신천 이외에는 지류가 존재하지 않으므로, 4-nitrophenol은 본류 근처의 도시지역과 공업지역에서 배출되는 것으로 추정된다.

금호강5 지점의 실측값을 입력값으로 하여 금호강6 지점을 모의해 본 결과, 모의값은 실측값의 60%

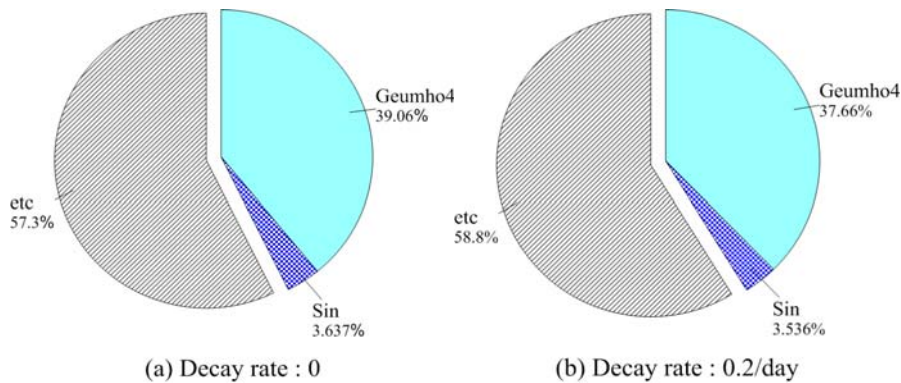


Fig. 6. Contribution rate with Geumho4 and Sin sampling sites for Geumho5.

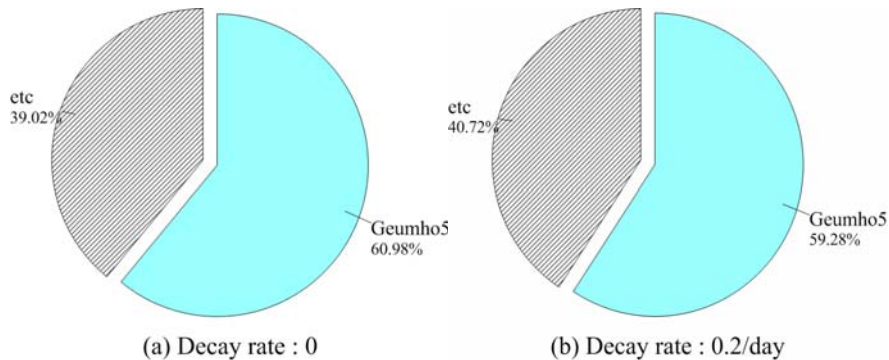


Fig. 7. Contribution rate with Geumho5 sampling site for Geumho6.

정도의 값을 가지는 것으로 모의되었다(Fig. 7). 구간 5(금호강5 ~ 금호강6) 지역의 경우 중간에 달서천이 있고, 이곳에는 대규모 염색단지과 하수처리장이 위치하여 이들의 영향으로 추정된다. 실제 염색단지의 배출수를 조사한 결과 4-nitrophenol이 검출된 사례가 있다(Nakdong River Watershed Management Committee, 2015). 그리고 금호강6 지점까지 대규모 공업단지가 위치하고 있으므로 이 지역에 대해서도 지속적인 모니터링이 필요할 것으로 생각된다.

4. 결론

본 연구에서는 모니터링 자료와 수치모형을 이용하여 금호강 유역에서 검출되는 4-nitrophenol의 거동을 모의하고 이를 통하여 하류 지점에 대한 상류 지점과 지류 지점의 기여율을 평가하고, 잠재 오염원의 영향 여부를 파악하였으며, 이를 통해 내린 결론은 다음과 같다.

1) 금호강 유역에는 다양한 종류의 잠재 오염원이 산재해 있으며, 이들 오염원을 일일이 평가하기란 쉬운 일이 아니다. 그러므로 본 연구에서는 상류 지점에서 측정된 농도를 이용하여 하류 지점의 농도를 입력값으로 하여 4-nitrophenol의 거동을 파악하고, 이를 통해 잠재 오염원의 영향 여부를 판단하였다.

2) 상류와 지류 지점 각각을 하나의 오염원으로 가정하여 그 측정값을 입력값으로 하여 하류로의 농도 변화를 모의한 결과, 본류 지점의 농도값은 하류로 갈수록 농도가 서서히 변하는 한편, 지류 지점의 경우는

본류와 합류하면서 그 농도값이 10배 이상으로 크게 감소하는 것으로 모의되었다. 이를 통해 하류 지점의 4-nitrophenol은 주변 잠재 오염원의 영향이 없을 경우 상류 지점의 영향을 받을 것으로 판단된다.

3) 본류 지점을 기준으로 하여 금호강 유역을 나누어 구간을 설정한 후 구간 내 상류 측정값을 이용하여 잠재 오염원을 평가한 결과 구간 3(금호강3 ~ 금호강4) 지역을 제외한 전 지역에서 잠재 오염원의 영향이 존재하는 것으로 모의되었으며, 특히 구간 1(금호강1 ~ 금호강2) 지역에서 잠재 오염원의 영향이 매우 큰 것으로 모의되었다. 이 지점에 대하여 측정 지점을 추가하여 4-nitrophenol의 거동을 면밀히 파악하는 것이 중요할 것으로 사료된다.

4) 금호강 유역을 본류 측정 지점을 기준으로 나눔으로서 유역 내 산업 구조에 대해 보다 면밀히 조사할 수 있었으며, 4-nitrophenol의 오염원에 대해서도 보다 심층적인 조사를 수행할 수 있었다. 그러나 4-nitrophenol은 사용 범위가 넓으므로, 본 연구를 보다 면밀히 수행하기 위해서는 산업단지의 경우 각 업소별 취급품목과 생산 공정, 그리고 폐기물의 처리 방법 등에 대한 조사가 수행되어야 하며 골프장과 농경지의 경우 농약 사용량과 농약 종류 등에 대한 조사가 선행되어야 할 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 낙동강수계관리위원회 2016년 환경기초 조사사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

REFERENCES

- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), 1992, Toxicological profile for nitrophenols : 2-Nitrophenol, 4-Nitrophenol, ATSDR, Atlanta, GA USA.
- Branger, F., Tournebize, J., Carlier, N., Kao, C., Braud, I., Vauclind, M., 2009, A Simplified modelling approach for pesticide transport in a tile-drained field : The pestdrain model, *Agr. Water Manage.*, 96(3), 415-428.
- Brunner, P., Simmons, C. T., 2012, HydroGeoSphere : A Fully integrated, physically based hydrological model, *Groundwater*, 50(2), 170-176.
- Donlon, B. A., Razo-Flores, G., Lettinga, E., Field, J. A., 1996, Continuous detoxification, transformation, and degradation of nitrophenols in upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors, *Biotechnol. Bioeng.*, 51(4), 439-449.
- Frei, S., Lischeid, G., 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.
- Global Land Cover Facility (GLCF), 2015, <http://glcf.umd.edu/data/landcover/>
- Hallas, L. E., Alexander, M., 1983, Microbial transformation of nitroaromatic compounds in sewage effluent, *App. Environ. Microbiol.*, 46(1), 1234-1241.
- Hayatsu, M., Hirano, M., Tokuda, S., 2000, Involvement of two plasmids in fenitrothion degradation by *Burkholderia* sp. Strain NF100, *App. Environ. Microbiol.*, 66(4), 1737-1740.
- Huber, A., Bach, M., Frede, H. G., 2000, Pollution of surface waters with pesticides in Germany : Modeling non-point source inputs, *Agric. Ecosyst. Environ.*, 80(3), 191-204.
- 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.
- Kourakos, G., Harter, T., 2014, Parallel simulation of groundwater non-point source pollution using algebraic multigrid preconditioners, *Comput. Geosci.*, 18(5), 851-867.
- Laroche, A. M., Gallichand, J., Lagacé, R., Pesant, A., 1996, Simulating atrazine transport with HSPF in an agricultural watershed, *J. of Environ. Enging.*, 122(7), 622-630.
- Lee, M. H., Choi, I. C., 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.
- Luo, Y., Zhang, M., 2009, Management-oriented sensitivity analysis for pesticide transport in watershed-scale water quality modeling using SWAT, *Environ. Pollut.*, 157(12), 3370- 3378.
- McCuen, R. H., 2004, Hydrologic analysis and design - Third edition, Pearson Prentice Hall, New Jersey, USA.
- Ministry of Environment (MOE), 2014, Statistics of sewerage, Ministry of Environment, Sejing, Korea.
- Munnecke, D. M., Heish, D. P. H., 1974, Microbial decontamination of parathion and p-Nitrophenol in aqueous media, *Appl. Microbiol.*, 28(2), 212-217.
- 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.
- Panday, S., Huyakorn, P. S., 2004, A Fully coupled physically-based spatially-distributed model for evaluating surface/subsurface flow, *Adv. Water Resour.*, 27(4), 361-382.
- Partington, D., Brunner, P., Frei, S., Simmons, C. T., Werner, A. D., Therrien, R., Maier, H. R., Dandy, G. C., 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.
- Water Resources Management Information System (WAMIS), 2015, <http://www.wamis.go.kr/>
- Yin, Y., Sykes, J. F., Normani, S. D., 2015, Impacts of spatial and temporal recharge on field-scale contaminant transport model calibration, *J. Hydrol.*, 527, 77-87.