



수치모형을 이용한 DNOC의 물질 거동 모의와 오염원 추정 연구

Study on the simulation of contamination route and estimation of the pollution sources of DNOC using a numerical model

박경덕·김일규*
Kyeong-Deok Park·Il-Kyu Kim*

부경대학교 환경공학과
Department of Environmental engineering, Pukyong National University

ABSTRACT

To estimate pollution sources in the watershed with various industries, the simulation of contamination route and distribution of 2-methyl-4,6-dinitrophenol(DNOC) were performed with a numerical model Hydro Geo Sphere. This study was performed calculations of the load using the measured concentration and simulated flow rate. And, the river was divided by the sampling sites at the mainstream, and the contribution rate at downstream sampling sites was calculated for each section. The results showed the concentration of the downstream sampling sites were decided by the concentration of upstream sites, and the contribution rates of the tributaries were calculated below 10%. The results also showed that the impact of the potential sources in Section 1(Geumho1 ~ Geumho2) and Section 5(Geumho5 ~ Geumho6) was larger than in the other area. In Section1 and Section5, It seemed to require detailed investigation.

Key words: condition grading protocol, sewer CCTV inspection, sewer condition assessment, sewer defect code, sewer defect score

주제어: 오염 기여율, 오염원 추정, 오염부하량, 수질 모델링

1. 서 론

일반적으로 오염 여부를 관찰하고, 오염원을 추정하는 데 모니터링을 이용한 추정법이 널리 이용된다. 국내에서는 “수질 및 수생태계 보전에 관한 법률”에 따라 수질을 상시 측정함으로써 오염 여부를 관찰하고 있다.

그러나 대상물질이 수계 내로 유입이 되지 않도록 사전에 차단하는 사전적 조치가 오염 여부를 파악하고, 이미 오염된 지역을 정화하는 사후조치 보다 환경적, 비용적 측면에서 더욱 중요하며, 오염을 예방하기

위해서는 대상 유해물질이 배출되는 오염원 지역을 색출하는 것이 필수적이다.

또한 모니터링의 결과값은 농도로 표시되는데, 농도값 만으로는 실제 예상 지점에서 유출되는 오염물질의 양을 추정하기 어렵고, 특히 강우기에는 유량의 급격한 증가로 인해 유출되는 오염물질의 양을 제대로 파악하기 어려운 단점이 있다. 이에 본 연구에서는 수치모형을 이용하여 오염의 정도를 파악하고 오염원이 존재할 것으로 추정되는 지역을 선정하여 수질오염을 예방하는 데 그 목적이 있다. 또한 수치모형을 이용하면 농도뿐만 아니라 유량도 함께 모의할 수 있으므로, 대상물질의 부하량을 추정할 수 있는 장점이 있어, 우선적으로 관리가 필요한 지역을 선정하는 데

Received 5 December 2016, revised 26 January 2017, accepted 1 February 2017

*Corresponding author: Il-Kyu Kim (E-mail: ikkim@pknu.ac.kr)

pp. 001-006
pp. 007-012
pp. 013-019
pp. 021-028
pp. 029-037
pp. 039-050
pp. 051-062
pp. 063-072
pp. 073-081
pp. 083-091
pp. 093-101
pp. 103-114

중요한 기초자료로 활용될 수 있다.

오염원 추정 연구는 불특정 오염원들에 대하여 수계에 어떤 영향을 미치는지 정량적인 평가가 가능하여 수자원 관리 측면에서 그 중요성이 증대되고 있다(Liu and Ball, 1999; Mahar and Datta, 2001; Li et al., 2016). 그러나 오염원을 추정하기 위해서는 대상 물질에 대한 수계 내 거동특성과 유역 내 산업구조 등의 사전조사가 필요하다(Liu and Ball, 1999). 게다가 한정된 모니터링 자료만을 이용하여 불특정 오염원의 위치뿐만 아니라 유출량과 유출 추정 시간까지 모의해야 하므로, 기존의 오염물질의 거동 모의보다 불확실성이 더욱 클 수밖에 없다(Cheng and Jia, 2010). 또한 오염원을 추정하는 대부분의 연구는 비교적 유속이 느린 지하수를 대상으로 수행된 사례가 많으며, 지표수의 경우 지하수에 비해 유속이 빠르고, 주위 환경에 영향을 많이 받으므로, 비교적 추정이 쉽지 않다(Li et al., 2016). 그럼에도 불구하고 지표수 영역에 대한 오염원 추정 연구는 전 세계적으로 꾸준히 진행되고 있으며, 현재까지도 오염원을 추정하기 위한 다양한 방법이 시도되고 있다(Cheng and Jia, 2010).

Katopodas and Piasecki(1996)와 Piasecki and Katopodas(1997)는 대상물질의 거동 특성을 고려한 유한차분법을 이용하여 강이나 하구에 위치하는 오염원에 대하여 환경에의 영향을 평가하였으며, 이를 토대로 배출량 조절에 대한 가이드라인을 제시하였다. Badia et al.(2005)은 확산-이류 방정식을 이용하여 강에서의 COD와 BOD에 영향을 줄 수 있는 점오염원을 추정하였다. Boano et al.(2005)은 오염원의 식별과 환경에의 영향을 평가하기 위하여 지구통계학 기법을 이용하였다. Cheng and Jia(2010)는 역추적 기법을 이용하여 지표수 영역에 대하여 점오염원을 추정하였다. Zhang and Xin(2016)은 유전 알고리즘 (genetic algorithm)으로, Li et al.(2016)은 신경망 기법(radial basis collocation method)을 이용하여 각각 오염원을 추정하였다.

우리나라에서는 특히 지표수에 대한 의존도가 높아 지표수 영역에 대한 오염원 추정 연구가 더욱 중요하다. 그러나 우리나라의 경우 외국에 비해 인구 밀도가 높고, 다양한 산업이 혼재해 있는 경우가 많으며, 이러한 지역에 대하여 오염원을 추정한 연구는 우리나라 뿐 아니라 전 세계적으로도 미미한 실정이다.

본 연구에서는 다양한 오염원이 혼재해 있는 지역

에 대해 유량을 반영한 대상 물질의 거동 및 분포를 적절히 모의하고, 오염원 발생 가능 지역을 추정하며, 이를 통해 오염 경로 파악과 불특정 오염원에 대한 오염 기여도를 산정하여 효율적인 수자원 관리 대책을 마련하고 수질보전을 위한 정책을 수립하는 데 효율적인 수단으로 활용하고자 한다.

2. 모형 선정 및 적용

2.1 수치모형 선정

본 연구에 사용된 모형은 HydroGeoSphere(HGS)이다. 이 모형은 3차원 지하수 모형인 FRAC3DVS에 2차원 지표수 영역을 추가하고, 지표수-지하수 간의 상호작용까지 표현할 수 있도록 설계되었으며, 물 흐름과 함께 물질의 거동 또한 함께 표현할 수 있어 다양한 형태의 물 흐름을 모의할 수 있다(Brunner and Simmons, 2012).

Yin et al.(2015)은 지하수계 내의 TCE를 대상으로 오염을 거동하였으며, De Schepper et al.(2014)은 농경지에서 농업에 필요한 수자원을 관리하기 위해 지하수 흐름 패턴을 파악하고 지하수에 포함된 화학종과 입자의 거동을 모의하였다. Bartsch(2013)는 산악 지형과 농경지에서 장마가 발생했을 때 질산염과 유기탄소의 거동을 모의하였고, Kourakos and Harter(2014)는 HGS와 algebraic multigrid를 이용한 질산염의 비점오염원을 모의하는 연구를 진행하였으며, Lutz et al.(2013)은 동위원소법과 결합하여 경사면에서의 농약류의 거동을 모의하였다.

이처럼 HGS는 다양한 무기/유기 오염물질에 대한 거동 모의가 가능하며, 지표수-지하수 영역과 영역 사이의 상호작용, 그리고 기상요인(강수, 증발산 등)까지 모의에 이용될 수 있으므로 유량을 보다 정밀하게 모의할 수 있어 오염원 추정 연구에 적합한 모형으로 판단된다.

2.2 대상유역 선정

금호강은 낙동강의 지류 중 하나로, 포항시 북구에서 발원하여 영천시, 경산시를 지나 대구광역시 성서에서 낙동강과 합류한다.

70년대 급격한 산업화와 도시화로 인해 산업폐수와 생활하수가 금호강으로 다량 유입되었으며, 영천댐의



축조로 인해 금호강의 유지용수가 급격히 줄어들게 되어 80년대에 이르러서는 수질이 급격히 악화되었다. 게다가 1991년에는 폐놀 유출사고로 인해 유해물질에 대한 사회적 문제로 주목받는 계기가 되었다.

이후 금호강에 대한 정기적인 수질 조사를 실시하고 각종 정화시설을 설치하는 등 금호강 유역의 수질을 개선하기 위하여 많은 노력을 기울였으며, 이러한 노력으로 현재는 수질이 회복 단계에 이르렀다. 그러나 금호강 유역에는 상류부터 하류까지 다양한 형태의 오염원이 존재하므로, 이 지역에 위치하는 다양한 오염원을 관리하기 위해 보다 효율적인 수자원 관리 대책 마련이 필요하다.

2.3 입력자료 구성

금호강 유역을 표현하고, 물 흐름을 모의하기 위하여 150 m 해상도의 DEM 자료를 이용하여 유한요소망을 구성하였다. 물 흐름을 보다 정밀하게 모사하기 위해서 GLCF(2016)에서 제공하는 1 km 해상도의 토지피복도를 이용하였고 (Fig. 1), McCuen(2004)이 제시한 대로 토지피복 종류에 따라 Table 1과 같이 마찰계수를 달리 설정하여 물의 지표 유출 정도를 조정하였다.

금호강 유역의 유량을 모의하기 위해서 샘플링 당일로부터 1~2개월 전까지의 강수량 자료와 시설용량 10,000 m³/day 이상 용량의 하수처리장에 대한 배출용량 자료를 수집, 활용하였으며, 이를 통해 모의된 유량은 금호강 유역 내에 위치하는 유량측정소 5개 지점에서 측정된 샘플링 당일의 유량자료에 근접하도록 모의하였다(WAMIS, 2016; MOE, 2014).

본 연구에서 모의되는 대상 유해물질은 2-methyl-4,6-dinitrophenol(DNOC)이다. DNOC는 주로 제초제 등의 농약류에 사용되었던 물질이며, 그 외에도 플라스틱 제조나 살균제, 염료, 의약품 제조 등에도 사용된다(WHO, 2000). 그러나 DNOC는 적은 양으로도 생물들에게 독성을 일으키며, DNOC가 체내에 분해될 경우 DNOC보다 독성이 더 높은 물질이 생성되기도 한다(Smith et al., 1952; Castilho et al., 1997; Takakashi et al., 2003). 또한 수중에서는 수개월 정도 분해되지 않는 난분해성 물질로, 잔류하여 수중 생태계에 지속적인 영향을 미칠 것으로 우려된다(Broholm et al., 2001; Hutanu et al., 2013). 이러한 이유로 DNOC는 1990년대부터 미국과 유럽에서는 농약으로서 사용이 금지되었으나, 동유럽 일부 지역에는 여전히 DNOC를 사용하는 것으로 조사되었다(ATSDR, 1995; Bieganska, 2005). 특히 금호강 유역에서는 DNOC가 전 측정지점에서

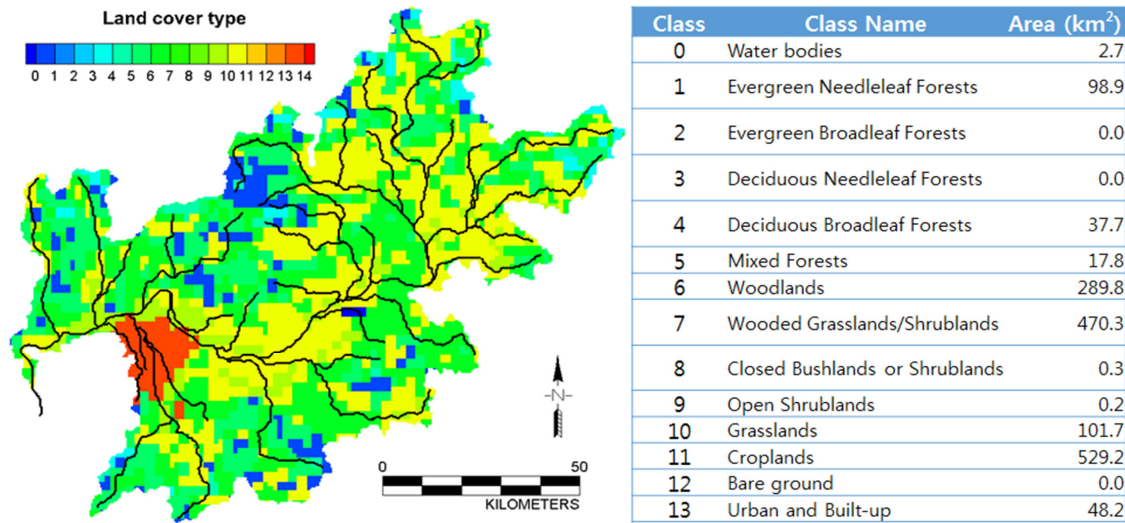


Fig. 1. Land cover in Geumho watershed.

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. 2. Distribution of the Sampling sites.

검출되고 있어, DNOC에 대한 오염원 추정과 관리대책 마련이 필요하다(Nakdong River Watershed Management Committee, 2015).

본 연구에서 적용한 수계 내 DNOC의 반감기는 3 주 정도이며, 1차식 ($\ln(C/C_0) = -kt$)을 이용하여 감소율 (decay rate)을 계산하여 모의에 이용하였다 (WHO, 2000). 모든 모의는 오염물질이 간헐적으로 배출되지 않고 일정하게 배출된다는 가정 (continuous type) 하에 진행되었으며, 모의에 필요한 측정 자료는 Nakdong River Watershed Management Committee (2015)의 연구 결과를 이용하였다. 샘플링 지점은 Fig. 2와 같으며, 강우로 인한 급격한 유량변화가 일어날 가능성이 비교적 적은 갈수기(4월)의 자료를 활용하였다.

3. 연구 결과

3.1. 유량 모의 결과 및 부하량 산정

강우량 자료와 하수처리장 방류량을 토대로 금호강 유역의 샘플링 당시의 유량에 맞도록 모의하였다. 이때

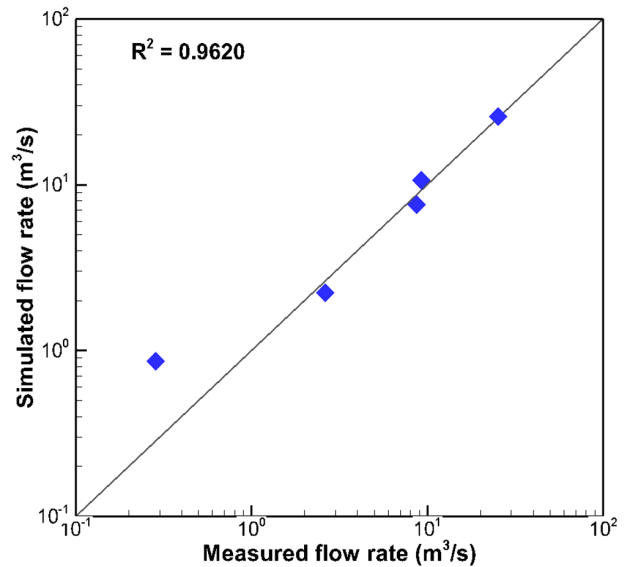


Fig. 3. Comparison between the measured and simulated flow rate.

입력값으로 사용된 강수량은 상류 3.28 mm, 중·하류 0.65 mm로, 실제 강수량과 약 1 mm 정도의 차이를 보이는 범위 내에서 강수량을 조정하여 보정하였다. 이러한 방법으로 모의된 유량과 실제 샘플링 당시의 유량이 비슷한 값을 갖도록 모의할 수 있었으며, 이때의 결정계수(R^2)는 0.9620로 나타났다(Fig. 3).

샘플링 지점에서 측정된 DNOC의 실측값과 모의를 통해 얻어진 샘플링 지점에서의 유량을 적용한 부하량을 구하여 각 지점별로 그 패턴을 분석하였다(Table 2). 그 결과, 대체적으로 하류로 갈수록 부하량이 증가하는 추세를 보이고 있으며, 특히 금호강1 ~ 금호강2 지점과 금호강4 ~ 금호강5 지점 사이에서 부하량이 급격히 증가하는 것을 확인하였다.

3.2 상류 측정 결과를 이용한 DNOC의 농도 변화 모의

상류 지점에서 측정된 DNOC가 하류로 이동하면서 어떤 농도분포를 보이며, 하류 지점에 얼마나 기여하는지

Table 2. Calculated load of DNOC using simulated flow rate in sampling sites

Site	Geumho1	Geumho2	Geumho3	Geumho4	Geumho5	Geumho6
Conc. (ng/L)	57.6	52.6	45.5	61.2	38.1	61.1
Load (ug/sec)	2.489	479.147	570.836	841.623	777.151	1568.530
Site	Silyeong	Omok	Nam	Donghwa	Sin	
Conc. (ng/L)	37.9	50.4	14.4	21.6	22.2	
Load (ug/sec)	41.726	48.042	15.527	15.883	26.072	



알아보기 위해 상류 측정값을 단일 오염원으로 가정 하였을 때 하류로의 이동에 따라 DNOC의 농도변화 와 예상되는 부하량을 모의하였다(Table 3, Table 4).

그 결과, 지류 지점에서 측정된 농도값은 본류 합류점 에서 10배 이상 희석되었으며, 하류 지역일수록 본류의 높은 유량으로 인해 합류하며 희석되는 정도가 상류 지 역보다 더 크게 나타났다. 또한 금호강1 지점 역시 지류 에 위치하며, 하류로 이동하며 많은 지류들과 합류하여 유량이 많아지므로 금호강1 지점에서 측정된 농도는 하 류 지점에 거의 영향을 미치지 못하는 것으로 모의되었 다. 대신 본류로 들어서게 되면 지류가 합류하더라도 유량 변화가 비교적 크게 변동되지 않으므로, 지점에서 측정된 DNOC의 농도 역시 하류로 이동하면서 낮은 비 율로 감소되었다. 그러므로 하류 지점의 농도는 주로 상류 본류 지점 농도의 영향이 큰 것으로 판단된다.

3.3. 구간별 DNOC의 기여율 산정

DNOC에 대한 잠재 오염원의 영향 여부를 보다 명 확히 파악하고 그 기여율을 산정하기 위하여 Fig. 4와 같이 본류 측정 지점 사이를 하나의 구간으로 설정한 후, 각 구간별 상류 지점과 지류 지점의 측정농도를 입력하여 하류 지점을 모의하여 하류 지점의 실측값 과 비교하였다.

구간 1(금호강1 ~ 금호강2) 지역에 대한 DNOC의 기여율을 산정한 결과는 Fig. 5와 같다. 금호강2 지점 에 대한 잠재 오염원의 영향은 91%로 대부분을 차지 하였으며, 신령천 지점의 기여율은 8%, 금호강1 지점 은 1% 미만의 기여율을 나타내었다. 상류 지점의 영 향이 낮은 이유는 금호강1 지점이 지류에 위치하며, 금호강2 지점으로 이동할수록 여러 지류들과 만나 희 석되는 것으로 볼 수 있다. 그러나 잠재 오염원의 기

Table 3. Change of DNOC concentration and load from mainstream sites

Simulated Result		Geumho2	Geumho3	Geumho4	Geumho5	Geumho6
Input Data (Conc.)						
Geumho1 (57.6 ng/L)	Conc. (ng/L)	0.258	0.182	0.163	0.109	0.085
	Load(ug/sec)	2.347	2.283	2.246	2.232	2.194
Geumho2 (52.6 ng/L)	Conc. (ng/L)		37.136	33.327	22.331	17.446
	Load(ug/sec)		465.900	458.308	455.508	447.863
Geumho3 (45.5 ng/L)	Conc. (ng/L)			40.806	27.343	21.361
	Load(ug/sec)			561.160	557.732	548.373
Geumho4 (61.2 ng/L)	Conc. (ng/L)				40.992	32.024
	Load(ug/sec)				836.147	822.114
Geumho5 (38.1 ng/L)	Conc. (ng/L)					29.693
	Load(ug/sec)					762.260

Table 4. Change of DNOC concentration and load of DNOC from tributary sites

Simulated Result		Geumho2	Geumho3	Geumho4	Geumho5	Geumho6
Input Data (Conc.)						
Silyeong (37.9 ng/L)	Conc. (ng/L)	4.372	3.088	2.771	1.857	1.451
	Load(ug/sec)	39.826	38.737	38.106	37.873	37.238
Omok (50.4 ng/L)	Conc. (ng/L)		3.750	3.365	2.255	1.761
	Load(ug/sec)		47.041	46.275	45.992	45.220
Nam (14.4 ng/L)	Conc. (ng/L)		1.215	1.091	0.731	0.571
	Load(ug/sec)		15.249	15.001	14.909	14.659
Donghwa (21.6 ng/L)	Conc. (ng/L)			1.153	0.772	0.603
	Load(ug/sec)			15.851	15.754	15.490
Sin (22.2 ng/L)	Conc. (ng/L)				1.406	1.098
	Load(ug/sec)				28.671	28.190

pp. 001-006

pp. 007-012

pp. 013-019

pp. 021-028

pp. 029-037

pp. 039-050

pp. 051-062

pp. 063-072

pp. 073-081

pp. 083-091

pp. 093-101

pp. 103-114

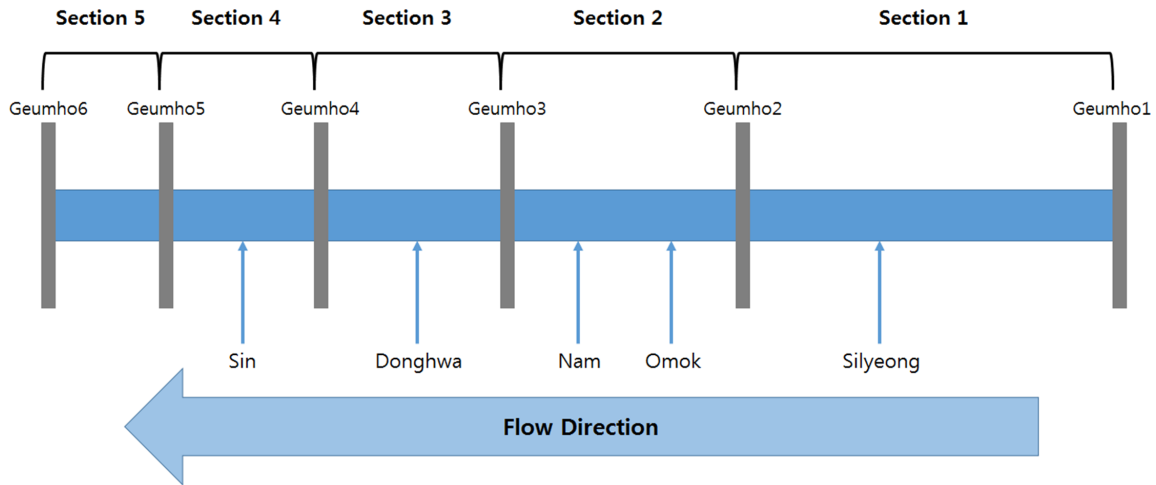


Fig. 4. Scheme of sections divided into the sampling sites.

여율이 91%로 나타난 점으로 미루어 볼 때 이 지역 내 일부 지역에서 DNOC로 인한 오염이 발생되었을 것으로 추정된다.

이 지역은 타 구간에 비해 길이가 길고, 농경지와 초지가 높은 비율을 차지하며, 골프장과 농경단지가 비교적 많이 분포하고 있어 이 지역 내에 추가적인 모니터링 지점을 선정하여 조사한다면, 오염원을 추정하는 데 보다 세부적인 정보를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. Won(2013)과 Kim et al.(2014)은 골프장에서 사용하는 농약류를 조사하였는데, 그 중 유기인계 살충제인 fenitrothion이 많이 사용된다고 보고하였다. fenitrothion이 토양 중으로 침투되면 토양 미생물에 의해 4-Nitrophenol이 생성될 수 있으며(Hayatsu et al., 2000), 이러한 과정을 거친 후 수계로 유입되었을

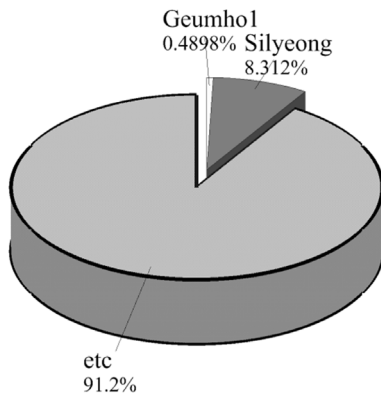


Fig. 5. Contribution rate with Geumho1 and Silyeong sampling sites for Geumho2.

것으로 추정된다. 또한 이 지역에는 농경지와 함께 농공단지도 여러 곳에 산재해 있다. Lee et al.(2008)의 연구에서 농공단지나 폐수처리시설에서 난분해성 물질이 배출되기도 한다고 보고한 바 있으므로, 이를 참조하여 농공단지나 폐수처리장에 대해서도 조사가 필요할 것으로 생각된다.

구간 2(금호강2 ~ 금호강3) 지역의 DNOC 잠재 오염원의 기여율을 산정한 결과는 Fig. 6과 같다. 금호강2 지점에 대한 잠재 오염원의 영향은 약 7%이며, 금호강2 지점에서 측정된 농도가 금호강3 지점 농도의 약 82% 정도 기여하는 것으로 나타나 금호강3 지점은 상류 지역의 영향을 많이 받는 것으로 추정된다.

구간 3(금호강3 ~ 금호강4) 지역에 대한 DNOC의 잠재 오염원의 영향을 모의한 결과는 Fig. 7과 같다. 상류 지점인 금호강3 지점의 영향은 67%로 나타났으며, 이 중 56% 정도는

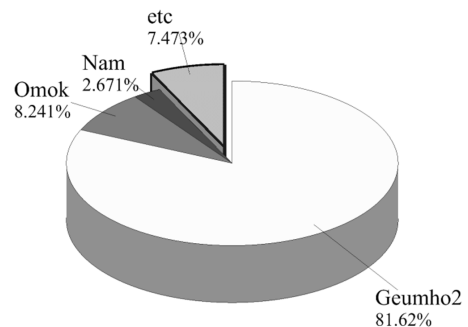


Fig. 6. Contribution rate with Geumho2, Omok and Nam sampling sites for Geumho3.



구간 1 지역에서 기인된 것으로 모의되어 구간 3 지역 역시 구간 1 지역의 영향이 큰 것으로 생각된다. 나머지 31%는 이 지역 내에 위치한 잠재 오염원의 영향으로 추정되며, 실제 구간 3 지역에는 대규모 산업 단지가 위치하고 있어, 이 지역에서 일부 유해물질이 유출된 것으로 생각된다.

구간 4(금호강4 ~ 금호강5) 지역에 대한 DNOC의 잠재 오염원의 영향은 Fig. 8에 나타내었다. 구간 4 지역은 도시지역을 지나며, 대규모 하수처리장과 산업 단지가 위치하고 있다. 그러나 금호강5 지점의 농도에 대한 기여율을 산정한 결과, 잠재 오염원의 영향은 나타나지 않았으며, 대신 금호강4 지점의 기여율이 97%로 대부분을 차지하였다. 이 중 약 53%는 구간 1 지역의 잠재오염원에서 기인된 것으로 추정되며, 구간 2 지역은 11%, 구간 3 지역은 32%로 산정되어 이 지역은 구간 1 지역과 3 지역의 영향이 큰 것으로 조사되었다.

구간 5(금호강5 ~ 금호강6) 지역의 잠재 오염원의 영향을 평가하기 위하여 금호강6 지점의 DNOC 농도를

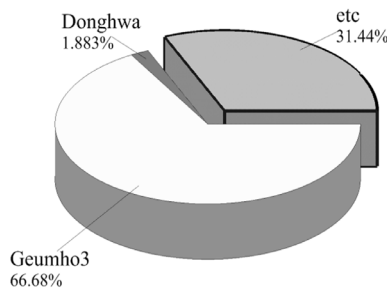


Fig. 7. Contribution rate with Geumho3 and Donghwa sampling sites for Geumho4.

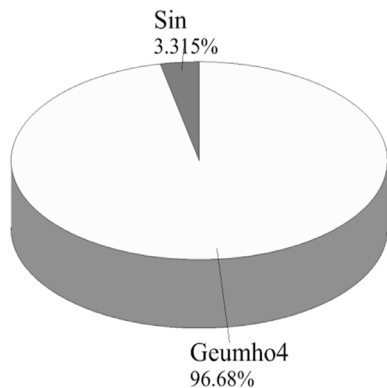


Fig. 8. Contribution rate with Geumho4 and Sin sampling sites for Geumho5.

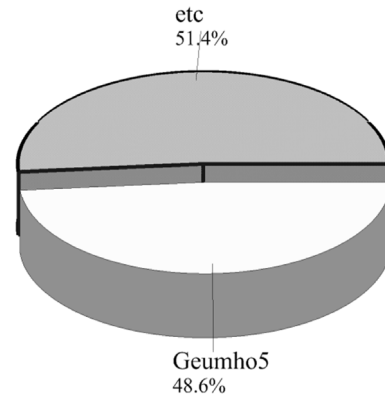


Fig. 9. Contribution rate with Geumho5 sampling site for Geumho6.

모의하였다(Fig. 9). 그 결과, 잠재 오염원의 기여율은 약 51%로 산정되었다. 이 지역 내에는 대규모 산업단 지들이 존재하며, 그중에는 대규모 염색단지가 위치 하고 있다. DNOC가 염료 제조에 사용된다는 점을 고 려하면, 염색단지에서 다량 배출되었을 가능성이 있 다. 또한, 구간 5 지역의 하류 지역에도 대규모 공단 이 위치하고 있어 이 지역에 대하여 세부적인 모니터 링을 실시한다면, 이 지역에 위치하는 잠재 오염원에 대하여 영향 여부와 기여율을 산정하는 데 보다 확실 한 정보를 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있 었다.

- (1) 샘플링 지점에 대한 실측 농도와 모의된 유량을 이용하여 부하량을 산정한 결과, 전체적으로 하 류로 갈수록 부하량이 높아지는 것을 확인할 수 있으며, 특히 상류 지역(금호강1 ~ 금호강2)과 하류 지역(금호강5 ~ 금호강6)에서 많은 양의 DNOC가 배출된 것으로 추정된다.
- (2) 지류 지점에서 측정된 DNOC의 농도는 본류와 합류하면서 최소 10배 이상 희석되어 본류 지점 의 농도에는 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 모의되었다. 추후 지류에 대한 영향을 연구할 경우, 지류 지점에서 측정된 농도뿐만 아니라, 지류의 규모 또한 함께 고려해야 할 것으로 생 각된다.

pp. 001-006

pp. 007-012

pp. 013-019

pp. 021-028

pp. 029-037

pp. 039-050

pp. 051-062

pp. 063-072

pp. 073-081

pp. 083-091

pp. 093-101

pp. 103-114

- (3) 구간별 기여율 산정 결과를 종합해 보면 다음과 같다. 구간 1 지역에서 DNOC의 잠재 오염원의 영향이 91%로 나타났으며, 구간 2 ~ 4 지역에서는 잠재 오염원의 영향이 크지 않고, 상류 지역의 농도에 영향을 받는 점을 고려해 볼 때 구간 1 지역에서 배출된 DNOC가 구간 4 지역의 하류 지점인 금호강5 지점까지 큰 영향을 준 것으로 나타났다. 그리고 금호강5 지역에서 DNOC를 배출하는 시설이 존재하여 이 지역에서 배출되는 DNOC와 상류에서 내려온 DNOC가 함께 낙동강 본류로 이동하는 것으로 판단된다. 그러므로 DNOC의 오염원을 추정하기 위하여 구간 1 지역과 구간 5 지역에 대해서는 세부적인 조사가 필요할 것으로 생각된다.
- (4) 본 연구는 2015년 갈수기에 측정된 자료만을 이용하여 오염원을 추정하였다. 모니터링 자료가 추가되고, 본 연구와 같은 방법을 통해 시기별로 대상물질에 대한 기여율을 산정하여 그 결과가 계속적으로 축적된다면 각 시기별 오염 패턴을 비교하고 변화 정도를 파악할 수 있어 향후 오염원 추정 결과가 더욱 명확해 질 것으로 생각된다. 또한, 본 연구에 사용된 수치모형은 다양한 오염원이 산재해 있는 지역이라도 오염 패턴을 파악하고, 오염원을 추정하는 데 효율적인 수단으로 활용 가능할 것으로 기대된다.

References

- ATSDR(Agency for Toxic Substances and Disease Registry) (1995). Toxicological profile for dinitrocresols, ATSDR, Atlanta, GA, USA.
- Badia, A.E., Ha-Duong, T., 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), 1121-1136.
- Bartsch, S. (2013). Monsoonal affected dynamics of nitrate and dissolved organic carbon in a mountainous catchment under intensive land-use, Doctor's Thesis, the University of Bayreuth, Bayreuth, Germany.
- Bieganska, J. (2005). Neutralization of 4,6-dinitro-o-cresol waste pesticide by means of detonative combustion, Environ. Sci. Technol., 39(4), 1190-1196.
- Boano, F., Revelli, R., Ridolfi, L. (2005). Source identification in river pollution problems: A geostatistical approach, Water Resour. Res., 41(7), W07023.
- Broholm, M.M., Tuxen, N., Rugge, K., Bgerg, P.L. (2001). Sorption and degradation of the herbicide 2-Methyl-4,6-dinitrophenol under aerobic conditions in a sandy aquifer on Vegen, Denmark, Environ. Sci. Technol., 35, 4789-4797.
- Brunner, P., Simmons, C.T. (2012). HydroGeoSphere: A fully integrated, physically based hydrological model, Groundwater, 50(2), 170-176.
- Castilho, R.F., Vicente, J.A.F., Kowaltowski, A.J., Vercesi, A.E. (1997). 4,6-Dinitro-o-cresol uncouples oxidative phosphorylation and induces membrane permeability transition in rat liver mitochondria, Int. J. Biochem. Cell Bio., 29(7), 1005-1011.
- Cheng, W.P., Jia, Y. (2010). Identification of contaminant point source in surface waters based on backward location probability density function method, Adv. Water Res., 33(4), 397-410.
- De Schepper, G., Therrien, R., Refsgaard, J.C., Hansen, A.L. (2014). Simulating coupled surface and subsurface water flow in a tile-drained agricultural catchment, J. Hydrol., 521, 374-388.
- GLCF(Global Land Cover Facility). <http://glcf.umd.edu/data/landcover/> (March 3, 2016).
- Hayatsu, M., Hirano, M., Tokuda, S. (2000). Involvement of two plasmids in fenitrothion degradation by burkholderia sp. Strain NF100, Appl. Environ. Microbiol., 66(4), 1737-1740.
- Hutanu, C.A.D., Zaharia M., Pintilie O. (2013). Quenching of tryptophan fluorescence in the presence of 2,4-DNP, 2,6-DNP, 2,4-DNA and DNOC and their mechanism of toxicity, Molecules, 18(2), 2266-2280.
- Katopodes, N.D., Piasecki, M. (1996). Site and size optimization of contaminant sources in surface water systems, J. Environ. Eng., 122(10), 917-923.
- Kim, D.J., Yoon, J.K., Yoo, J.Y., Kim, S.J., Yang, J.E. (2014). Status and management strategy of pesticide use in golf courses in Korea, J. Appl. Biol. Chem., 57(3), 267-277.
- Kourakos, G., Harter, T. (2014). Parallel simulation of groundwater non-point source pollution using algebraic multigrid preconditioners, Comput. Geosci., 18, 851-867.
- 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.
- Li, Z., Mao, X.Z., Li, T.S., Zhang, S. (2016). Estimation of



river pollution source using the space-time radial basis collocation method, *Adv. Water Res.*, 88, 68-79.

Liu, C., 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.

Lutz, S.R., Van Meerveld, H.J., Waterloo, M.J., Broers, H.P., Van Breukelen, B.M. (2013). A model-based assessment of the potential use of compound-specific stable isotope analysis in river monitoring of diffuse pesticide pollution, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, 4505-4524.

Mahar, P.S., Datta, B. (2001). Optimal identification of ground-water pollution sources and parameter estimation, *J. water Resour. Plann. Manage.*, 127(1), 20-29.

McCuen, R.H. (2004). *Hydrologic analysis and design*. 3rd Ed., Pearson Prentice Hall, New Jersey, USA.

MOE(Ministry of Environment) (2014). Statistics of sewerage.

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.

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

Smith, J.N., Smithies, R.H., Williams R.T. (1952). Urinary metabolites of 4:6-dinitro-o-cresol in the rabbit, *Biochem. J.*, 54(2), 225-230.

Takahashi, K.L., Aoyama, H., Kawashima, K., Teramoto S. (2003). Effects of dinoseb, 4,6-dinitro-o-cresol, and 2,4-dinitrophenol on rat Sertoli-germ cell co-cultures, *Reprod. Toxicol.*, 17(2), 247-252.

WAMIS(Water Resource Management Information System). <http://www.wamis.go.kr/> (February 16, 2016).

WHO(World Health Organization) (2000). Environmental Health Criteria 220: Dinitro-o-cresol, Geneva, Switzerland.

Won, J.O. (2013). A study on the use and soil residuals of pesticide in golf courses of Korea, Master's Thesis, Kwangwoon University.

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.

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

pp. 001-006

pp. 007-012

pp. 013-019

pp. 021-028

pp. 029-037

pp. 039-050

pp. 051-062

pp. 063-072

pp. 073-081

pp. 083-091

pp. 093-101

pp. 103-114