



EFDC-WASP 연계모형을 이용한 소규모 농업용 저수지 비소 농도 모의

Simulating Arsenic Concentration Changes in Small Agricultural Reservoir Using EFDC-WASP Linkage Model

황순호^a · 신새별^b · 송정현^c · 윤광식^d · 강문성^{e,†}

Hwang, Soonho · Shin, Sat Byeol · Song, Jung-Hun · Yoon, Kwang Sik · Kang, Moon Seong

Abstract

Even if a small amount of arsenic (As) is entering to small agricultural reservoir from upper streams, small agricultural reservoir becomes sensitive to changes in arsenic concentration depending on the water level in case of accumulation continuously because of its scale. If we want to manage arsenic concentration in small agricultural reservoir, it is very important to understand arsenic changes in agricultural reservoir. In spite of the fact that modeling is the most accurate method for analyzing arsenic concentration changes in small agricultural reservoirs, but, it is difficult to monitor arsenic change everyday. So, if data is prepared for modeling arsenic changes, water quality modeling is more effective than monitoring. Therefore, in this study, arsenic concentration changes was simulated and arsenic concentration change mechanism in small reservoir was analyzed using hydrological and water quality monitoring data and by conducting EFDC (Environment Fluid Dynamics Code)-WASP (Water Quality Analysis Simulation Program) linkage. EFDC-WASP coupling technique was very useful for modeling arsenic changes because EFDC can consider hydrodynamic and WASP can perform arsenic concentration simulation, separately. As a results of this study, during dry season, As concentration was maintained relatively high arsenic concentrations. Therefore, water level control will be needed for managing As concentration of reservoir.

Keywords: EFDC; WASP; arsenic modeling; EFDC-WASP model linkage; reservoir

1. 서 론

국내에 존재하는 금속광산들은 대부분이 폐광된 광산이지만, 금속 광산의 경우 선광 및 제련과정을 거친 후에 남겨진 광산폐기물(광미 등)은 강우시 유출되어 하류부 토양 및 수체 내 중금속 오염을 야기하기도 한다 (Lindsay, 1979; Kang et al., 2010; Kim et al., 2015). 다양한 중금속 오염원 중에서도 비소 (Arsenic, As)는 낮은 농도에서도 독성이 강하여 생태계에 미치는 영향이 크며 (Kim, 2003), 여러 수생태 중 농업용

저수지가 비소로 오염이 될 경우, 비소로 오염된 관개용수는 관개 시 작물에도 영향을 줄 수 있기 때문에, 저수지 내의 비소 오염 변화 양상을 파악하고 오염원 차단 혹은 저수지 관리가 중요하다고 할 수 있다. 특히 소규모 농업용 저수지의 경우, 일부 하천으로 광해로 인해 비소 (As)가 소량 유입된다 하더라도 지속적으로 축적이 되는 경우 환경 및 수체 체적 변화에 따른 비소 농도 변화에 민감하게 된다.

소규모 저수지에서의 비소 농도 변화를 분석하기 위해서는 모니터링이 가장 정확하다고 할 수 있으나 일별로 전기간에 대해 모니터링을 수행하는 것은 어려움이 있으므로 모델링을 이용한 방법이 효율적이라 할 수 있다. WASP (Water Quality Analysis Simulation Program) 모형은 여러 수질 모의 모형 중 비소 농도 모의가 가능한 모형으로, 미국 EPA (United States Environmental Protection Agency, US EPA)에서 TMDL (Total Maximum Daily Loads) 수립시에도 사용하고 있는 공개된 보편적인 모형이라 할 수 있다. 하지만, WASP 모형만을 가지고는 저수지의 수위 변화에 따른 비소 농도 변화를 모의하기는 어려우며, 저수지 수위 변화에 따른 비소 농도 변화 모의를 위해서는 수리동역학적 모형과의 연계가 중요하다. WASP 모형의 경우, WASP6 버전부터 EFDC (Environment Fluid Dynamics Code) 모형과 Hydro 부모형을 통해 연계가 가능하게 되어 EFDC-WASP 연계 모형의 구축이 가능해졌다.

^a PhD Student, Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University

^b PhD Student, Department of Agricultural and Biological Engineering, University of Florida

^c Research Scholar, Department of Agricultural and Biological Engineering & Tropical Research and Education Center, University of Florida

^d Professor, Department of Rural and Biosystems Engineering, Chonnam National University

^e Professor, Department of Rural Systems Engineering, Research Institute for Agriculture and Life Sciences, Institute of Green Bio Science and Technology, Seoul National University

† Corresponding author

Tel.: +82-2-880-4582 Fax: +82-2-873-2087

E-mail: mskang@snu.ac.kr

Received: April 12, 2018

Revised: July 23, 2018

Accepted: August 21, 2018

WASP 모형을 이용한 비소 모의와 관련한 연구는 많지 않으나, Caruso (2004)는 광해로 인한 하천의 중금속 오염 모델링을 위해, WASP5 모형을 이용하여 비소 (Arsenic), 카드뮴 (Cadmium), 구리 (Copper), 납 (Lead), and 아연 (Zinc)에 대하여 하천 구간별 농도 모의를 수행한 바 있다. 국내에서는 Kim (2003)이 역시 WASP5 모형을 이용하여, 화북담을 대상으로 비소 농도 모의를 수행한 바 있다. 하지만 비소 농도의 경우, 저수지로의 지속적인 유입이 없다 하더라도 저수지 수위 등 저수지 환경 변화에 따라 비소 농도가 변할 수 있으므로 저수지의 수리동역학적 변화를 고려하는 것이 중요하다. 따라서 앞서 기술한 바와 같이 현재는 EFDC-WASP 연계 모델 운영이 가능한데, 국외의 경우, Wool et al. (2003)이 미국의 Neuse 강 하구를 대상으로 클로로필-a에 대해 모의를 수행한 바 있고, Jia et al. (2011)은 중국의 Nansha 강을 대상으로 유역 내 수질오염에 점오염원과 비점오염원이 미치는 영향을 분석한 바 있다. 국내에서는 EFDC-WASP 연계 모형을 강에서의 수질 모의 (Seo et al., 2009; Seo et al., 2012) 뿐만 아니라 댐 및 저수지 (Park et al., 2010; Seo et al., 2011; Choi, 2012), 운하 (Yin and Seo, 2013) 등에 적용하여 다양한 연구에 활용하고 있다. 하지만 현재 농업용 저수지 기작에 따른 EFDC-WASP 연계 모형 모의를 통한 저수지 내 비소 (As)를 모의하고 그 결과를 평가한 연구는 전무한 실정이다.

따라서 본 연구의 목적은 소규모 농업용 저수지의 관개 기작을 고려한 저수지 수체 체적 변화에 따른 비소 농도 거동을 모의하기 위하여, EFDC-WASP 연계 모형을 구성하고, 소규모 저수지 내 시기별 비소 농도 변화를 분석하는 것이다. 이를 위하여 본 연구에서는 (1) 연구대상지에 대한 분석 및 모형의 입력자료 구축을 위해 수문 및 토질 모니터링과 측량을 수행하고, (2) 소규모 농업용 저수지의 하루 농경지에 대한 관개 용수 공급을 고려하였으며, (3) 저수지 내 수리동역학적 변화에 따른 비소 (As) 농도 모의를 위한 연계모형을 구성하여 수행하였다.

II. 연구대상지 및 연구방법

1. 연구대상지

본 소유역은 안성천 유역 상류에 위치하고 있으며, 배후 유역 크기가 작아 평소에는 주로 건천을 이루고 있으나, 배후 유역의 토지이용이 대부분 산림지역으로 2017년 수문 모니터링 결과, 본 유역은비교적 큰 강우시 일시에 유량이 급격히 증가하는 특징을 보인다. 본 소규모 농업용 저수지에 유입하는 하천은 크게 2군데가 있으며, 하천#1 (Stream#1)의 상류지

점 (Yang#5)에서는 모니터링 기간동안 비소가 전혀 검출되지 않았으며, 저수지에 인근한 하류지점 (Yang#1)에서만 간혹 비소 농도가 높게 나타났으나 평시에는 호소수 및 농업용수 수질환경 기준 (하천수에 대해서는 비소 농도 기준이 존재하지 않음)인 0.05 mg/L를 만족하는 수준에서 농도가 낮게 나타났다 (Fig. 1). 또한 하천#2 (Stream#2)에서는 상류지점 (NNM#2)와 하류지점 (NNM#1) 모두 비소 농도가 기준 농도인 0.05 mg/L를 만족하는 수준에서 농도가 낮게 나타났다 (Fig. 2).

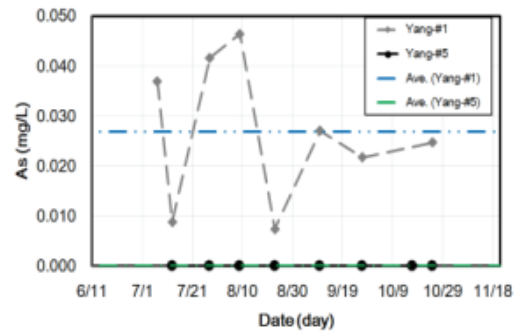


Fig. 1 Results of As concentration monitoring at Stream#1 (Inflow#1)

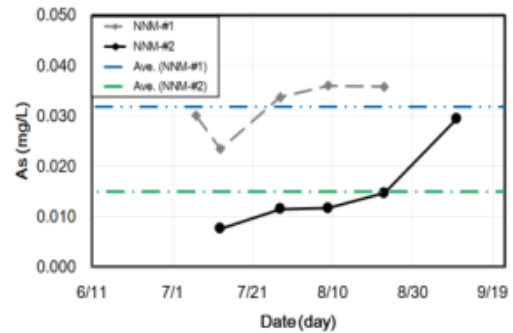


Fig. 2 Results of As concentration monitoring at Stream#2 (Inflow#2)

하지만, 모니터링 기간 (6월 - 11월) 동안 유역 내 5개 지점에서 채수한 수질 샘플에 포함되어 있는 부유사 (SS, Suspended solid)의 비소 농도를 측정된 결과, 수질에서 비소가 검출되지 않은 하천#1의 상류 지점 (Yang#5)에서도 부유사 (SS)의 비소 농도가 평균 12.62 mg/kg로 검출되었으며, 그 외 지역에서도 비소 농도가 평균적으로 37 mg/kg - 136 mg/kg의 범위에서 비소가 검출되었다. 따라서, 저수지 상류 유역에 대한 수질 모니터링 결과 유입 하천의 비소 농도는 높지 않았으나 부유사의 비소 농도는 높게 나타나 저수지 상류 유역의 광미로 인한 비점오염원의 유입을 확인하였다.

2. 농업용 저수지 비소 농도 모의를 위한 연계모형 구축

본 연구에서는 소규모 저수지에서 비소 (As) 농도 모의를 위해 EFDC-WASP 연계모형을 이용하였다. 우선, EFDC-WASP 연계모형의 입력자료로서 수문자료인 저수지 유입량 및 저수지 유출량 (방류량)을 추정하기 위하여, 유역 수문모형인 SWAT 모형 (Soil and Water Assessment Tool)을 이용하여 유역유출량을 모의하고, 저수지 운영 모형인 MASA (Module based hydrologic Analysis System for Agricultural watersheds)모형을 이용하여 방류량을 산정하였다.

소규모 저수지에서 비소 (As) 농도 모의를 위해서는 WASP 모형을 이용하였는데, 비록 EFDC 모형에서도 중금속 모의가 가능하나, 총 중금속 농도에 대해서만 모의가 가능하므로 호내의 비소 (As) 농도 모의를 위해서는 WASP 모형을 이용하여야 한다. WASP 모형의 경우 수질 모의만 가능하고, 농업용 저수지와 같이 유입량 및 관개량과 유출량에 따라 수위가 지속적으로 변하는 수체의 경우, 수리동역학적 계산을 해줄 수 있는 모형이 필요하다. WASP6 이전 버전에서는 수리동역학적 계산을 위하여 DYNHYD5 부모형을 이용하였으나, WASP6 버전부터는 EFDC, SWMM의 transport module 등과 연계가 가능하게 되었다. 본 연구에서는 수리동역학적인 모의를 위해 EFDC 모형을 활용하였고, WASP모형에서는 EFDC 모형의 수리동역학적 모의 결과를 바탕으로 독성모형 (비소 모의)을 실행하게 된다.

EFDC-WASP 모형의 연계는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 Hydro 모듈 부분에서 EFDC 결과 파일 (.hyd)을 수용함으로써 가능하다. 즉, EFDC 모의시 WASP과의 연계를 위하여, EFDC-Hydro 모듈을 통해 연계 파일을 생성한 후, WASP 모

형에서 Hydro 부분에서 입력자료로 받아 수체 내 3차원 수리동역학적 변화를 고려한 수질 모의가 가능하다.

3. EFDC 모형 구축

EFDC 모형은 오픈소스로 공개된 수리학적 모형으로 EFDC 모형의 물리학 및 계산 체계의 많은 측면은 Blumberg-Mellor 모형 (Blumberg and Mellor, 1987)과 동일하다. 즉, EFDC 모형은 Blumberg-Mellor 모형 (Blumberg and Mellor, 1987)을 기반으로 가변 밀도 흐름에 대해 수직적으로 정수압 (vertically hydrostatic) 가정을 하며, 자유표면 (free surface), 그리고 난류 평균의 3차원 운동 방정식 (turbulent averaged equations)의 해를 구하는 것이 가능하다 (Tetra Tech, Inc, 2007; Choi et al., 2012). 또한 EFDC 모형은 수리동역학적 (Hydrodynamics) 모듈 외에도, 수질 (Water Quality) 모듈, 유사 운송 (Sediment Transport) 모듈, 독성물질 (Toxic) 모의 모듈 (중금속 포함) 등 총 4개의 모듈로 구성되며, 수리동역학적 계산 결과는 수질모의 (Water Quality), 유사 운송 (Sediment transport), 독성물질 (Toxics) 모의에 이용된다 (Tetra Tech, Inc, 2007). 본 연구에서는 WASP 모형과의 연계 운영을 위하여 수리동역학 (Hydrodynamics) 모듈만을 이용하였다.

본 연구에서는 EFDC 모델링을 위하여 측량한 자료를 바탕으로 소규모 저수지에 대한 모의 격자망을 구성하였다 (Fig. 4, Fig. 5). 비록 격자 구성은 측량 자료를 기반으로 상세하게 구성이 가능하나, 일반적으로 수치 해석 모형은 계산 격자가 정방형의 형태인 경우가 안정적인 모의가 가능하므로 (Choi et al., 2012), 모의 시간의 단축을 위해서는 적절한 크기 및 숫자의 격자를 구성하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 격자 구성의 적절성을 분석한 후, 최종적으로 유효계산격자는 수

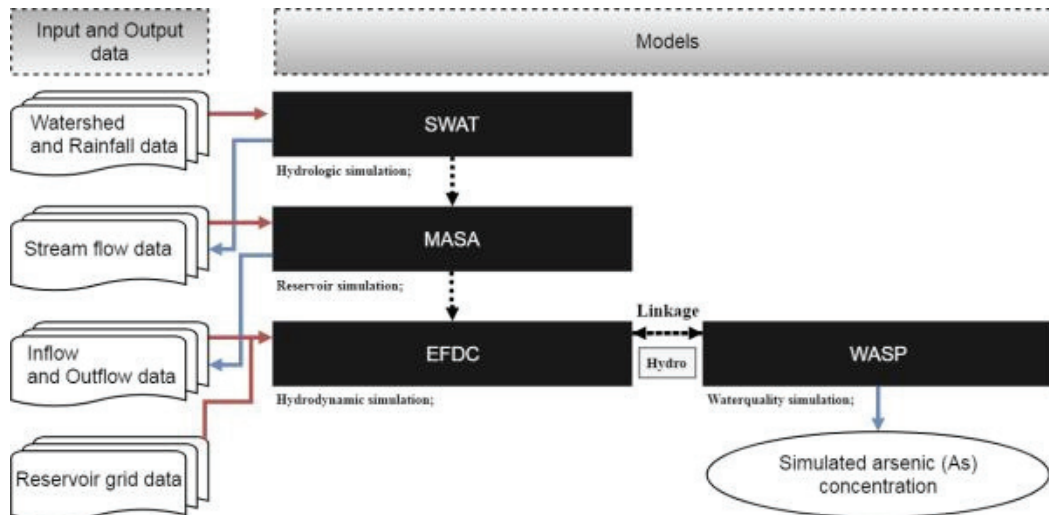


Fig. 3 Diagram of coupling SWAT, MASA, EFDC and WASP models

평방향으로 168개이며, 수직방향 격자는 3개의 등간격층으로 구성하였다. 격자체계는 수평방향으로 직교좌표계를 사용하였고, 수직방향으로는 σ -좌표계를 사용하였다. σ -좌표계의 특징은 다양한 층 두께 설정이 가능하고 수심이 급변하는 영역에 대한 수치 오차를 방지 할 수 있다는 장점이 있다 (Jeon, 2012).

하류 농경지에 대한 관계에 따른 저수지 유입량 및 유출량 자료를 생산하기 위하여, 물넘이를 통한 방류 (Weir) 및 관개용수 공급 (Irrigation)에 관한 자료는 Song (2017)이 개발한 물수지 기반 농업유역 수문해석 시스템 모형인 MASA 모형을 이용하여 구축하였다. EFDC-WASP 연계 모의를 위한 입력자료로서, EFDC 모형의 입력 격자를 구성하기 위해서는 소규모 농업용 저수지의 내용적 자료가 필요하며, 본 연구를 위해 측량을 실시하였다. Fig. 6은 소규모 농업용 저수지 측량 결과를 바탕으로 2017년 수위-내용적 곡선을 작성한 것이다.

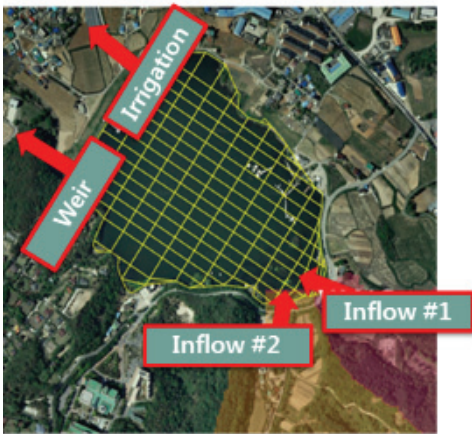


Fig. 4 Model grids and boundaries of the small agricultural reservoir

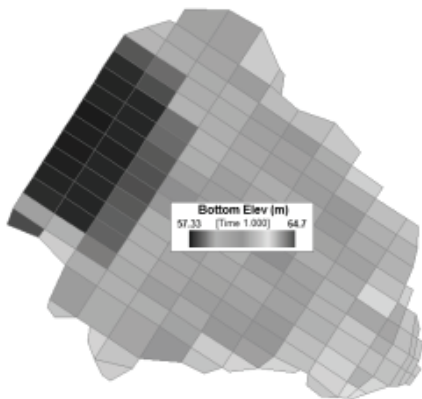


Fig. 5 Generated grids and bathymetry of the small agricultural reservoir

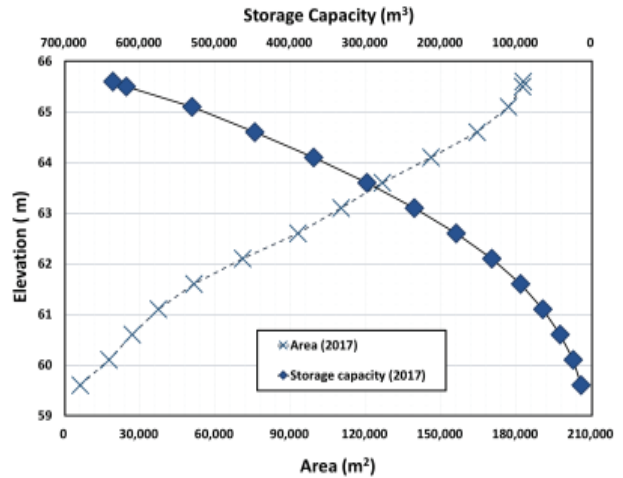


Fig. 6 Area-elevation and capacity-elevation relationship of the small agricultural reservoir

4. WASP 모형 구축

가. WASP 모형

WASP7 모형은 Di Toro et al. (1983); Connolly and Winfield (1984); Ambrose, R.B. et al. (1988) 등에 의해 지속적으로 발전되어 왔으며, 수리동역학적 모듈 및 수문학적 모듈을 보완하기 위하여 WASP6 이후부터는 EFDC 등의 수리모델과 SWMM 등의 유역모델의 연계사용이 가능하다. WASP 모형에는 부영양화를 모의할 수 있는 EUTRO 부모형과 독성물질 등 보존성 물질을 모의할 수 있는 TOXI 부모형이 있으며, TOXI 부모형의 매개변수 설정을 통해 비소 등의 중금속 모의가 가능하다. WASP 모형에서는 비소 항목을 선택할 수 있어 모의하는 것이 아니라 임의의 화학물질 모의를 위해 Chemical 항목에 매개변수를 설정하여 모의가 가능한데 (Kim., 2003), 본 연구에서는 농업용 저수지 모니터링 자료와 유출률 실험을 바탕으로 표층 (Surface water), 저층 (Subsurface water)에 대하여 매개변수를 설정하고, 비소의 경우 입자에 용존상태 혹은 입자에 흡착되어 이동하므로 WASP 모형 내 Solid 1 설정을 고려하여 모의하였다. 또한 본 연구에서는 현장에서 채수한 수질에 대한 부유사 (SS)의 입도분석 결과를 바탕으로, Segment 설정에서 표층과 저층에 대하여 Silt and fines (mg/L), Sand (mg/L) 자료를 입력하였으며, Boundary 조건에서 수질 모니터링 결과를 반영하여 Silt and fines, Sand에 대한 입력자료를 구성하였다.

나. 비소 (As) 모의

수체 내에서의 비소는 분할 계수에 따라 용존 상태이거나 고형 물질에 흡착된 상태로 존재한다 (Kim, 2003., Caruso,

2004). Fig. 7은 수체 내 비소의 용존 상태 (C_d) 및 고형 물질에 흡착된 상태 (C_p)와 분할 계수 (K_d)의 관계를 나타낸 것이다. 즉, 분할 계수는 고형 물질에 흡착된 수질 인자의 흡착 반응을 나타낸 것이며, 수체 내 비소의 흡착반응은 평형 상태인 경우 상대적으로 빠르게 이루어지고, 용존 비소의 농도에 비례하기도 한다 (kim, 2003).

분할 계수 (K_d)는 아래 식과 같이 표현된다.

$$C_p = K_d \cdot C_d \quad (1)$$

WASP 모형 내 비소 모의는 물질수지 식을 기본으로 분할 계수 (K_d) 및 호내의 부유 물질의 농도를 고려하여 비소 (As) 모의가 가능하며, 소규모 농업용 저수지에 대한 분할 계수를 산정하기 위해서는 칼럼실험을 통한 용출률 산정을 통해 가능하다.

다. 분할 계수 산정을 위한 칼럼실험

본 소유역에의 유입 하천의 비소 농도는 높지 않은 것으로 나타났으며 지속적으로 소규모 농업용 저수지에 유입되는 부유사의 퇴적으로 인해 소규모 농업용 저수지의 비소 오염 문제가 야기되는 것으로 보인다. 따라서 본 연구에서는 비소로 오염된 부유사의 유입 및 저층의 비소오염 퇴적으로 인한 소

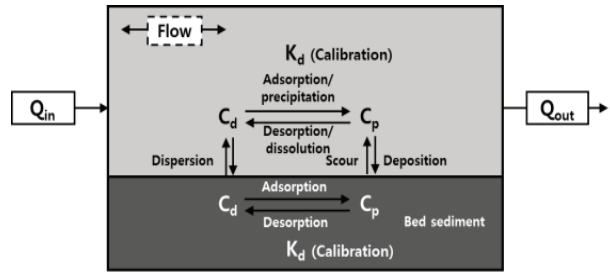


Fig. 7 Diagrams of Arsenic fate and transport processes in WASP model (Caruso, 2004)

규모 농업용 저수지의 오염 기작을 규명하기 위하여, WASP 모형의 입력자료로서 분할 계수를 산정하기 위해 칼럼실험을 수행하였다.

칼럼실험에 앞서 칼럼실험을 위한 시료로서 토양의 비소 농도 자료가 필요한데, 본 연구에서는 저수지 퇴적토의 비소 농도를 얻기 위하여, 저수지의 퇴적토 6지점의 시료를 혼합하여 2mm 체 선별한 후 V-믹서를 통해 24시간동안 혼합하여 균질한 토양(약 30kg)으로 제조한 후 동일한 토양 시료를 사용하였다.

칼럼실험은 Fig. 8에서와 같이 소규모 저수지의 환경 변화에 따른 비교적 장기간에 걸친 퇴적물로부터의 비소용출특성을 확인하기 위해 3가지 조건으로 나누어 실험을 진행하였으

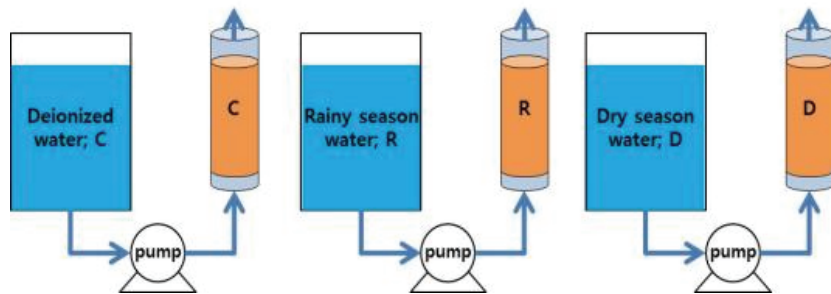


Fig. 8 Diagrams of column experiments for As leaching rate

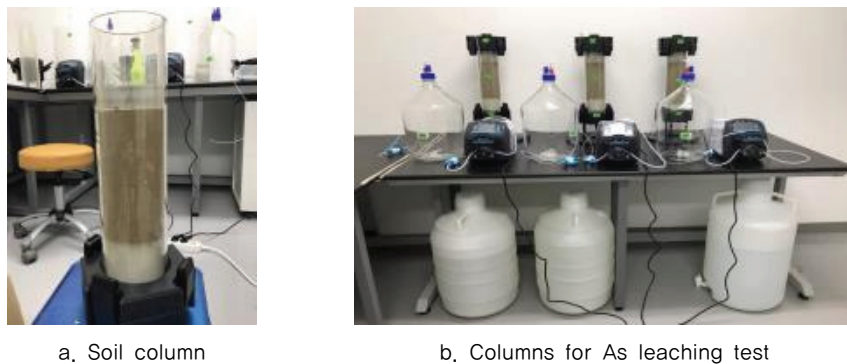


Fig. 9 Digital images of laboratory column experiments for As leaching rate

며, 3가지 조건은 각각 대조구 (탈이온수) (C), 우기 (R) 및 건기 (D) 조건이다. 우기와 건기를 나누어서 분할 계수 산정 실험을 진행한 이유는 일반적으로 우기는 7-8월에 이루어지고, 저수지 수위가 높게 유지되는 시기이며, 특히 비점오염원의 유입 등으로 인한 유입수에 유기물의 함량이 높은 시기이기 때문에 이와 반대의 상황인 건기와 용출률 비교를 통해 용출률의 차이를 고찰하기 위함이다.

칼럼실험은 지름 10cm, 높이 44cm의 칼럼에 대상지역에서 채취한 퇴적토를 완전 혼합하여 칼럼에 충전 시킨 후 상향류 방식으로 완전히 포화시켜 담수 환경을 조성한 다음 연속적으로 통과시켜 매일 1회 간격으로 총 15일간 채수하였다. 비소는 pH 등에 영향을 크게 받으므로 채수한 용출수의 pH를 측정 후 비소 함량을 분석하였고, 토양은 시험 전과 완료한 시료에 대해 중금속과 이화학 특성을 분석하였다. Fig. 9는 실제 칼럼 실험 수행하는 과정을 촬영한 것이다.

III. 결과 및 고찰

1. 저수지 유입량 모의 결과

SWAT 모형을 통한 상류 유역 유출량 모의는 Shin (2018)의 연구 결과를 인용하였으며, Fig. 10과 Fig. 11은 SWAT 모의 결과를 나타낸 것이다. 비록 본 연구에서 모델링을 위한 모니터링 기간은 2017년 7월-11월로 짧은 기간이라 할 수 있으나, 본 대상유역은 소하천의 최상류에 위치한 소유역으로 배후유역이 작아 12월-5월에는 주로 건천인 경우가 많아 유출이 발생하는 기간 동안은 모니터링을 원활히 수행하였다. 단, 본 대상지에 대한 모니터링 기간은 짧아 모델의 보정만을 수행하였다.

수문 보정 결과를 하천 1지점과 하천 2지점에 대하여 검토한 결과 (Shin, 2018), 하천 1지점의 경우 결정계수 R^2 (R-squared)은 0.79, 평균제곱근오차 RMSE (Root Mean Squared Error)는 4.40 mm 그리고 모형의 효율지수 (Nash-Scutcliffe

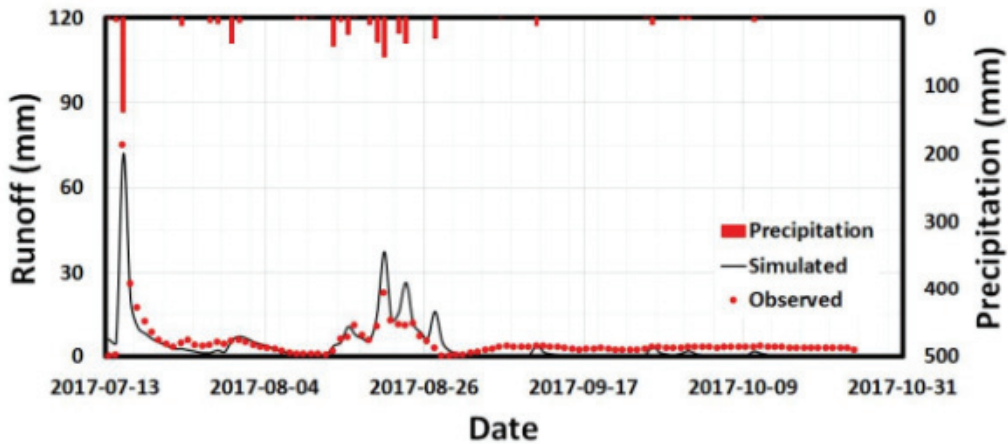


Fig. 10 The hydrologic simulation results of stream #1 (Shin, 2018)

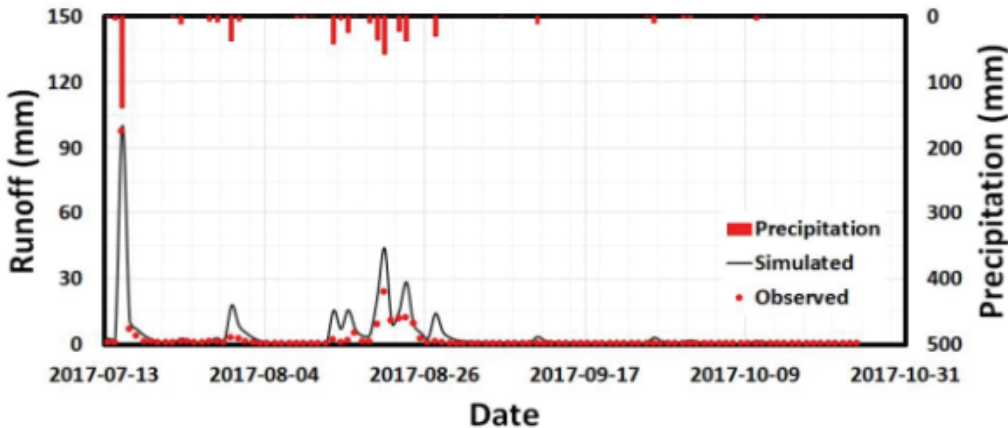


Fig. 11 The hydrologic simulation results of stream #2 (Shin, 2018)

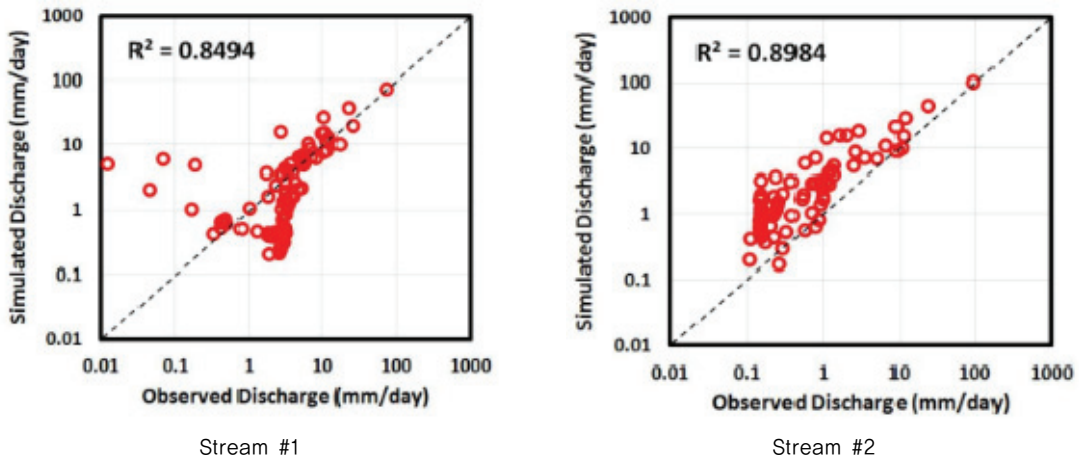


Fig. 12 The results of calibration of stream #1 and stream #2 (Shin, 2018)

Efficiency Coefficient, NSE) (Nash and Scutcliffe, 1970)는 0.11로 나타났다 (Fig. 12). 또한 하천 2지점의 경우는 R^2 은 0.91, RMSE는 5.80 mm 그리고 NSE는 0.86으로 나타나 (Fig. 12), Moriasi et al. (2015)의 기준에 따르면 두 하천에서 모두 모의 유출량이 실측 유출량을 비교적 잘 모의하는 것으로 나타났다.

2. 저수지 물수지 모의 결과

소규모 농업용 저수지의 경우, 저수지 수위 관측 자료는 존재하나 물넘이를 통한 방류량 및 관개량 자료를 얻기가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 EFDC 모형의 유출량 자료를 산정하기 위하여 MASA (Song, 2017) 모형을 이용하였다. MASA 모형의 저수지 물수지 모의를 위한 주요 매개변수는

저수지 유입량 관련 매개변수, 농업용수 공급량 관련 매개변수, 그리고 저수지 운영 관련 매개변수로 구분된다. 본 연구에서는 저수지 유입량의 경우 기 보정된 SWAT 모형의 결과를 이용하였으며, 저수지 운영 시 매개변수는 실측 저수지 수위 자료를 이용하여 추정하였다. 공급량 모의와 관련한 매개변수는 물꼬높이, 최소담수심, 침투량, 그리고 관개효율로 선행 연구의 문헌을 참조하여 선정하였다. 물꼬높이와 최소담수심은 국내의 관측 결과 (Kang et al., 2006; Yoo, 2009; Lee et al., 2016)를 바탕으로 Song (2017)이 정리한 수치를 이용하였으며, 일 침투량과 관개효율은 Yoo et al. (2013)이 소규모 농업용 저수지 인근의 저수지에 적용한 값인 각각 4.0 mm/day와 90 %를 이용하였다. 소규모 농업용 저수지의 실제 수위 운영을 분석한 결과 저수지 관리자의 조작에 따라 가뭄 시에도

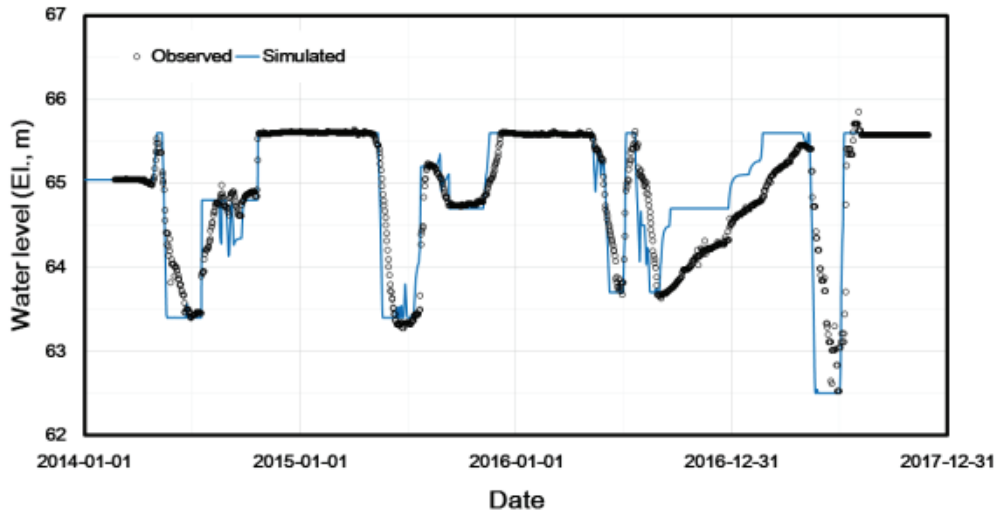


Fig. 13 Results of water level simulation in the small agricultural reservoir

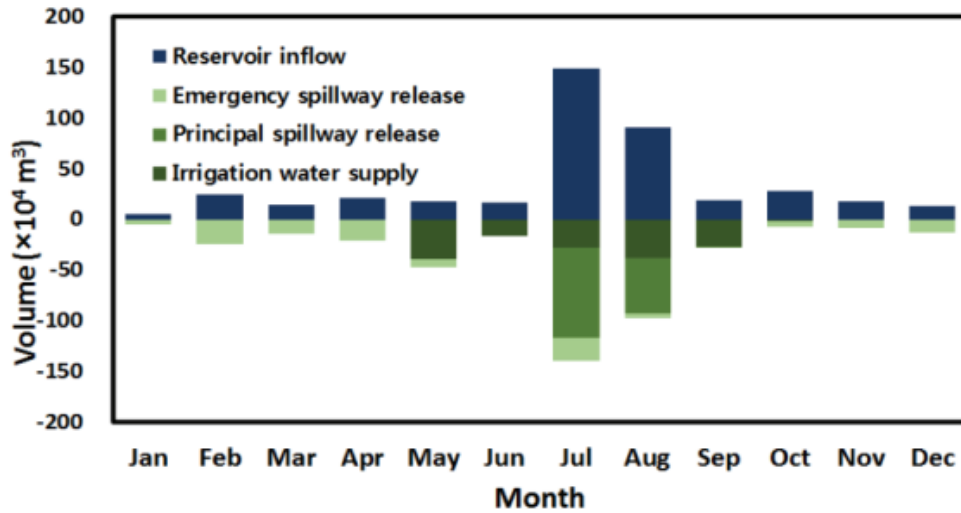


Fig. 14 Results of water balance simulation in the small agricultural reservoir

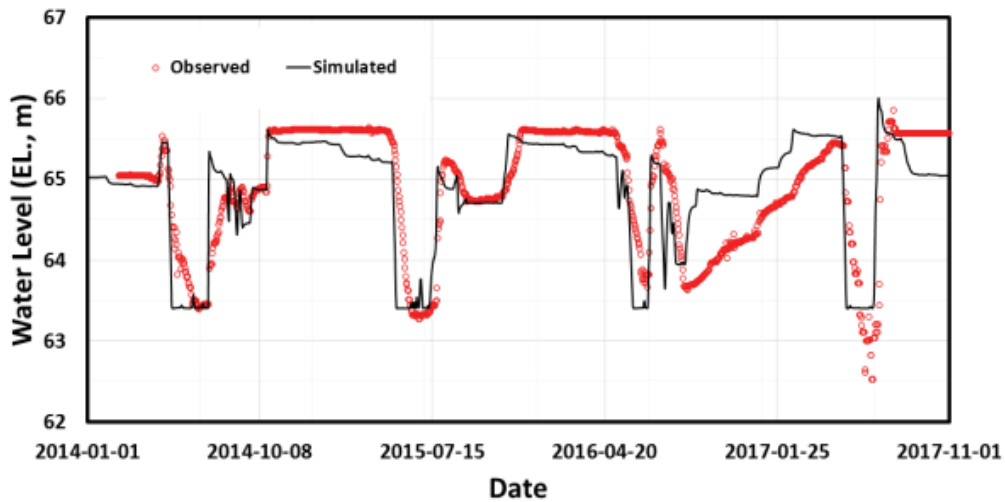


Fig. 15 Results of water level simulation in the small agricultural reservoir

농업용수를 공급하지 않아 사수위인 59.6 m까지 하강하지 않는 것으로 나타나고, 최소로 유지하는 관리 수위가 연별로 달라지는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 이러한 운영 특성을 모형에 반영하기 위하여 관리 최소수위를 실제와 유사하도록 연별로 조정하여 수위 (Fig. 13) 및 물수지 (Fig. 14)를 모의하였다.

3. EFDC 모형을 이용한 수위 모의 결과

EFDC 모형의 보정은 저수지 수위 관측자료로 수행하였으며, 보정기간은 2014년-2017년 8월까지로, 초기수심은 EL.65.0 m로 지정하였다. 대상저수지의 연구기간 내 평균 수심은 64.9 m로 나타났으며, 저수지 설계 재원상 만수위는 65.8 m 이다.

Fig. 15는 모형의 구동 결과인 수위 자료를 실측 수위와 비교한 것이며, 모의결과 R^2 은 0.39, RMSE는 0.65 m, NSE는 0.34로 나타났다. 통계적 변량이 낮게 나온 것은 MASA 모형에서 저수지 수문 조작자의 저수지 수문 조작에 따른 방류량 변화를 정확하게 모사하기 어렵기 때문이며, 시기별 저수지 수위 변화는 잘 모의하고 있는 것으로 나타났다.

4. 칼럼실험 결과 및 분할 계수 산정

칼럼 용출에 사용된 초기 수질의 화학특성은 Table 1과 같다. 용출수의 pH는 대조구 (Reference), 우기 (R) 및 건기 (D)가 각각 7.8-8.3, 7.5-8.0 및 7.6-8.0의 범위를 나타내었는데, 이는 산성 토양이 담수(환원)조건일 경우 용출수의 pH는 상승하다 중성의 범위에서 유지되는 일반적인 특성과 동일하게 나타났다.

Table 1 Initial water quality condition

Contents	pH	EC (dS/m)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)	PO4-P (mg/L)	As (mg/L)
Reference	5.8	0.006	0.08	0.055	0.000	0.000
R	7.6	0.176	3.25	0.070	0.045	0.011
D	7.9	0.328	2.18	0.155	0.136	0.136

용출수의 비소 농도는 시간에 따라 상이한 변화를 보였으나, 모든 조건에서 비소가 용출되었다. 각 조건별 용출경향을 보면, 대조구의 용출수는 시간이 경과함에 따라 용출되는 비소의 농도가 급격히 증가 (0.13-0.56 mg/L)하다 이후부터 변화 폭이 완만하게 증가 (0.57~0.60 mg/L)하는 경향을 보였다. 우기와 건기의 비소 농도 변화 역시 시험초기에는 대조구와 유사하게 급격히 증가하였으나, 시험 중반부터는 용출되는 비소의 농도가 감소하는 경향이 나타났다 (Fig. 16). 용출수의 일별 채수량을 기반으로 조건별 비소 누적용출량을 계산한 결과 역시 대조구가 가장 높았으며, 우기와 건기의 누적용출량을 비교하면 시험초기엔 건기에 비해 우기가 낮았으나 7일 이후부터는 건기의 비소 누적용출량보다 높아지는 것을 확인하였다 (Fig. 17). 비소는 일반적으로 pH가 높아지면 이동성이 증가하는 경향을 보이는데, 용출수 중 대조구의 비소 누적용출량이 우기와 건기에 비해 가장 높았던 원인은 상대적으로 높은 용출수의 pH 때문이다.

본 연구에서 분할 계수 (K_d) 산정에 사용한 평균 토양의 비소 농도는 59.38 mg/kg이며, 용출용액 내 비소 농도는 현장 수질의 pH (7.6)와 유사하게 pH가 수렴하는 13-15일차의 비소 농도를 평균하여 우기는 0.27 mg/L, 건기는 0.25 mg/L의 값을 이용하였다. 분할 계수 산정 결과, 우기는 0.000223 m³/g, 건기 0.000239 m³/g로 나타났으며, 이를 이용하여 WASP 모형을 이용한 비소 수질 모델링에 활용하였다.

5. EFDC-WASP 연계 모형을 이용한 비소 (As) 농도 모의 결과

WASP 모형을 이용한 비소 모의 결과는 Fig. 18과 같다. WASP 모형의 모의기간은 2017년 1월부터 - 2017년 10월까지이며, Fig. 18은 안정화 기간 2개월을 제하고 2017년 3월부터 2017년 10월까지의 결과를 나타낸 것이다. 보정기간은 수질 샘플링을 수행한 2017년 6월부터 2017년 10월이며, 용출물 실험 결과를 반영하여 용출률 및 모델링에 사용되는 매개변수를 보정하였다. 본 소유역의 상류 하천에 대한 모니터링 결과, 하천으로 유입되는 비소 농도는 높지 않은 것으로 나타났으나, 본 소규모 저수지의 저층에 분포하는 저수지 퇴적 토양의 비소 (As) 오염 정도가 높게 나타났으므로 연구에서는 소규모 농업용 저수지 내에서 용출되는 용출률을 주로 고려하였다.

Fig. 18의 모니터링 결과에서 보는 바와 같이 2017년 6월까지 대상저수지 내 비소 (As) 농도가 점차 높아진 것은 수위가 낮은 상태를 유지하는 동안 수온이 점차 올라감에 따라 퇴적물 유기물 분해와 산소 고갈에 따른 수체-퇴적물의 경계층 환원상태 형성에 따른 것이다. 모니터링 결과와 유사하게 EFDC-WASP 연계모형의 모의 결과에서도 저수위 유지 및 수온 상승에 따라 비소 농도가 점차 올라감을 알 수 있다.

2017년 6월 이후 대상저수지 내 비소 (As) 농도는 강우로 인해 상류 유역에 유출이 발생함에 따라 상류 유역으로부터 저수지로 유입량이 증가하게 되고, 저수지보다 상대적으로 낮은 온도의 물이 유입됨으로써 저수지 내 수체가 수직 혼합하게 된다. 이에 따라 수체-퇴적물의 경계층에 환원상태가 변화하고 비소 (As) 용출에 영향을 미치게 된다. 또한 강우시에 부유사의 유입에 따라 호내 비소가 흡착-침강함에 따라 비소 (As) 농도 감소에 영향을 준 것으로 보인다. EFDC-WASP 연

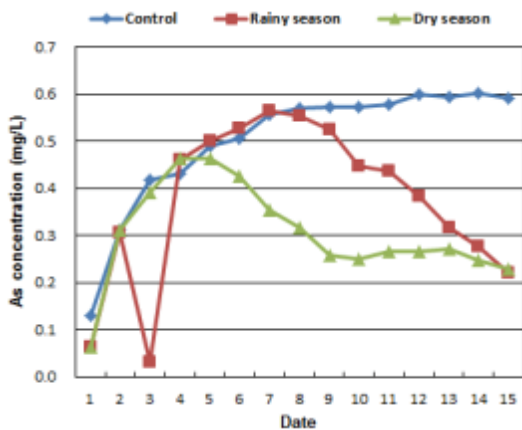


Fig. 16 Arsenic concentration changes over Time

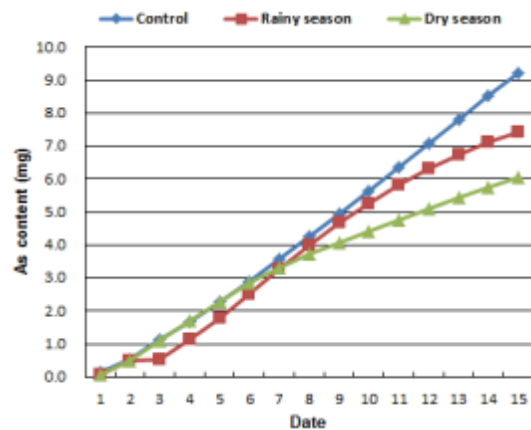


Fig. 17 Arsenic accumulated content over time

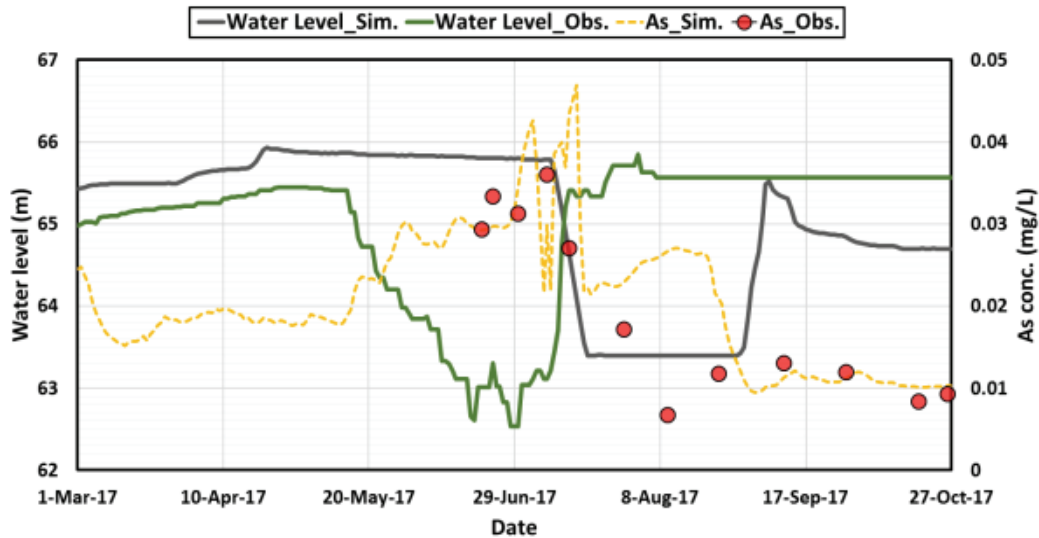


Fig. 18 Results of arsenic simulation in the small agricultural reservoir

계모형의 모의 결과에서도 이와 유사한 결과를 보이고 있으나 7월 30일 경을 보면, 실측 비소 (As) 농도에 비해 비교적 높은 농도를 유지함을 알 수 있는데, 이는 EFDC-WASP 모형에서 저수지 내 수체의 수직 혼합 및 유입 유사에 의한 흡착 침강 기작을 바로 반영하지 못하며, 또한 실측 수위와는 달리 수위가 만수위를 유지 하지 못하고 일부 하락함에 따른 영향이라 보여진다. 이후, 9월 경부터는 만수위를 유지함에 따라 비소 (As) 농도가 낮은 상태를 유지함을 알 수 있다.

따라서 본 소규모 농업용 저수지의 경우 비소 농도의 변화는 상류 유역에서 비소 (As) 오염된 유사의 유입 및 저수지 내 고농도 비소 (As) 오염 토양에 의해 호내 용출이 지속적으로 이루어지고, 시기별 환경적 변화로 인해 저수지 내 수체의 산화-환원 상태, 유사로 인한 흡착 및 침강의 기작에 따라 비소 (As) 농도 변화가 나타남을 알 수 있다. 본 EFDC-WASP 연계 모형의 모의기간동안 비소 (As) 농도는 호소수 및 농업용수 수질기준 (0.05 mg/L)을 초과하지는 않았으나 유입량이 적은 5-6월 시기에 농업용수 관개로 인한 수위 하강 및 수온의 상승으로 인해 상대적으로 높은 비소 (As) 농도를 유지하였다.

IV. 결 론

본 연구에서는 소규모 농업용 저수지 상류 유역에 광산 활동 후 남아있는 광미로 인한 저수지 내 비소 (As) 오염 및 거동 분석을 위하여, 모니터링 및 유역 유출모형 (SWAT)과 농업용 저수지 모의 모델 (MASA) 결과를 입력자료로 수리동역학적 모델 (EFDC) 및 호소 내 수질 모의 모델 (WASP)

모형을 연계하여 비소 (As) 농도 모의를 수행하였다.

소규모 농업용 저수지 토양 및 수체 모니터링 결과, 저수지 저면에 분포하는 토양의 비소 (As) 농도가 상당히 높게 나타났고, 저수지로 유입되는 하천에서의 비소 (As) 농도는 높지 않았으나 비점 오염으로 유입되는 유사의 비소 농도는 평균적으로 37 mg/kg - 136 mg/kg로 높게 나타났다. 따라서 저수지의 비소 오염 문제는 광미의 비점오염 형태의 유입으로 인한 저수지 내 퇴적 및 지속적인 용출 문제로 보인다. 본 연구에서는 연계모형을 통한 비소 (As) 농도 모의 시 주요 매개 변수로 퇴적토로부터의 용출률을 고려하여 실측 자료와 비교하여 보정을 실시하였다.

모니터링 및 모델링 결과, 소규모 농업용 저수지의 비소 (As) 농도 변화는 농업용수 관개 및 시기별 수온 변화와 강우 시 유입되는 유사 (SS) 등으로 인해 복합적인 영향을 받는 것으로 보인다. 특히, 5-7월 비강우시 상류 유역 유입량 및 부유사 (SS) 유입이 적고 온도가 점차 올라가는 시기에, 농업용수 관개가 이뤄지며 수위가 낮은 상태를 유지할 경우, 수체 체적 감소 및 수체-퇴적물의 경계층 환원상태 형성으로 인해 비소 (As) 용출이 늘어남에 따라 비소 (As) 농도가 호소수 및 농업용수 수질기준 (0.05 mg/L)에 거의 근사하게 상당히 높게 나타났다. 따라서 이 시기에는 급격히 높아진 비소 (As) 농도로 인하여 관개 용수의 중금속 오염 안전에 대한 우려가 커질 수 있다. 따라서 가뭄이 지속되는 시기에는 농업용수의 비소 (As) 오염에 대한 안전을 위하여 주위 대체 수자원을 활용하여 영농활동을 돕고, 집중적인 모니터링을 통해 관개 용수 비소 (As) 농도 변화를 관찰할 필요가 있어 보인다. 또한 저수지 내 비소 농도에 대한 궁극적인 관리를 위해서는 상류에서 유

입되는 고농도 비소 (As) 오염된 유사 저감을 고려하여야 하며, 호내 준설을 통한 고농도 오염 토양의 제거가 필요하리라 생각된다.

본 연구는 추후 영농기작을 고려한 EFDC-WASP 연계 모형 구축에 관한 연구뿐만 아니라 비소 (As) 오염을 포함하는 중금속 오염의 문제가 존재하는 농업용 저수지의 수질 모델링 및 수질 오염에 대한 평가를 위한 참고 자료로 활용할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (2017R1D1A1B03034463)

REFERENCES

- Ambrose, R. B., T. A. Wool, J. P. Connolly, and R. W. Schanz, 1988. *WASP4, A hydrodynamic and water quality model-model theory, user's manual, and programmer's Guide*. EPA/600/3-87-039, U.S. Environmental Protection Agency, Athens, GA.
- Blumberg, A. F., and G. L. Mellor, 1987. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. *Three-Dimensional Coastal Ocean Models, Coastal and Estuarine Science* 4(ed. N.S. Heaps): 1-19. *American Geophysical Union*. doi:10.1029/CO004p0001.
- Caruso, B. S., 2004. Modeling metals transport and sediment/water interactions in a mining impacted mountain stream. *Journal of the American Water Resources Association* 40(6): 1603-1615. doi:10.1111/j.1752-1688.2004.tb01609.x.
- Choi, H. G., D. I. Kim, C. H. Na, and K. Y. Han, 2012. Assessment of EFDC model for water quality analysis in Nakdong River. *Journal of Korea Water Resources Association* 45(7): 685-696 (in Korean). doi:10.3741/JKWRA.2012.45.7.685.
- Choi, I. S., 2012. Stratification Hydrodynamics and water quality modeling of reservoirs using EFDC-WASP7.4. Master Diss., Chungnam National University (in Korean).
- Connolly, J. P., and R. Winfield, 1984. *A user's guide for WASTOX, a framework for modeling the fate of toxic chemicals in aquatic environments. Part 1: exposure concentration*. EPA-600/3-84-077, U.S. Environmental Protection Agency, Gulf Breeze, FL.
- Di Toro, D. M., J. J. Fitzpatrick, and R. V. Thomann, 1983. *Water quality Analysis Simulation Program (WASP) and Model Verification Program (MVP) - documentation*. Contract No.68-01-3872, Hydrosience Inc., Westwood, NY, for U.S. EPA, Duluth, MN.
- Jeon, J. H., 2012. Effect of grid resolution of EFDC model on the hydrodynamic and water quality simulations in Saemangeum Reservoir. Master Diss., Chungbuk National University (in Korean).
- Jia, H., S. Wang, M. Wei, and Y. Zhang, 2011. Scenario analysis of water pollution control in the typical peri-urban river using a coupled hydrodynamic-water quality model. *Frontiers of Environmental Science & Engineering in China* 5(2): 255-265. doi:10.1007/s11783-010-0279-x.
- Kang, D. H., B. H. Kwon, H. S. Yu, and S. O. Kim, 2010. Discharge characteristics of heavy metals in acid mine drainage from the abandoned ilgwang mine. *Journal of Engineering Geology* 20(1): 79-87 (in Korean).
- Kang, M. S., S. W. Park, J. J. Lee, and K. H. Yoo, 2006. Applying SWAT for TMDL programs to a small watershed containing rice paddy fields. *Agricultural Water Management* 79(1): 72-92. doi:10.1016/j.agwat.2005.02.015.
- Kim, J. W., 2003. Modeling the fate of arsenic in reservoir using WASP5-TOXI5. Master Diss., Chungnam National University (in Korean).
- Korea Meteorological Administration (KMA), www.kma.go.kr. Accessed Nov. 2017.
- Kim, M. K., S. C. Hong, M. H. Kim, S. K. Choi, J. S. Lee, K. H. So1, and G. B. Jung, 2015. Assessment of the heavy metal contamination in paddy soils below part of the closed metalliferous mine. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 34(1): 6-13 (in Korean). doi: 10.5338/KJEA.2015.34.1.08.
- Lee, S. H., S. H. Yoo, J. Y. Choi, B. A. Engel, 2016. Effects of climate change on paddy water use efficiency with temporal change in the transplanting and growing season in South Korea. *Irrigation Science* 34(6): 443-463.
- Lindsay, W. L., 1979. *Chemical equilibria in soils*, John Wiley and Sons, New York, Chichester.
- Moriasi, D. N., M. W. Gitau, N. Pai, P. Daggupati, 2015. Hydrologic and water quality models: performance measures and evaluation criteria. *Transactions of the ASABE* 58(6): 1763-1785. doi:10.13031/trans.58.10715.

18. Nash, J. E., and J. V. Sutcliffe, 1970. River flow forecasting through conceptual models part I-A discussion of principles. *Journal of hydrology* 10(3): 282-290. doi:10.1016/0022-1694(70)90255-6.
19. Park, J. C., J. H. Choi, Y. I. Song, S. J. Song, and D. I. Seo, 2010. Water quality modeling of Youngju Dam reservoir by HSPF, EFDC and WASP. *Journal of environmental impact assessment* 19(5): 465-473 (in Korean).
20. Seo, D., M. Kim, and J. H. Ahn, 2012. Prediction of chlorophyll-a changes due to weir constructions in the Nakdong river using EFDC-WASP modelling. *Environmental Engineering Research* 17(2): 90-95. doi:10.4491/eer.2012.17.2.095.
21. Seo, D., and M. Kim, 2011. Application of EFDC and WASP7 in series for water quality modeling of the Yongdam dam, Korea. *Journal of Korea Water Resources Association* 44(6): 439-447. doi:10.3741/JKWRA.2011.44.6.439.
22. Seo, D. I., M. J. Seo, M. S. Koo, and J. K. Woo, 2009. Serial use of hydrodynamic and water quality model of the Geum river using EFDC-Hydro and WASP7.2. *Journal of Korean Society of Water and Wastewater* 23(1): 15-22 (in Korean).
23. Shin, S. B., 2018. Analysis of sedimentation processes in Ijang reservoir using SWAT and EFDC. Master Diss., Seoul National University (in Korean).
24. Song, J. H., 2017. Hydrologic analysis system with multi-objective optimization for agricultural watersheds. Ph.D. Diss., Seoul National University (in Korean).
25. Tetra Tech, Inc, 2007. *The Environmental Fluid Dynamics Code User Manual, USEPA Version 1.01*.
26. United States Environmental Protection Agency (US EPA), 2017.
27. Wool, T. A., S. R. Davie, and H. N. Rodriguez, 2003. Development of three-dimensional hydrodynamic and water quality models to support total maximum daily load decision process for the Neuse River Estuary, North Carolina. *Journal of Water Resources Planning and Management* 129(4): 296-306. doi:10.1061/(ASCE)0733-9496(2003)129:4(295).
28. Yin, Z., and D. Seo, 2013. Water quality modeling of the Ara Canal, using EFDC-WASP model in series. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* 35(2): 101-108 (in Korean). doi:10.4491/KSEE.2013.35.2.101.
29. Yoo, S. H., J. Y. Choi, S. H. Lee, Y. G. Oh, and D. K. Yun, 2013. Climate change impacts on water storage requirements of an agricultural reservoir considering changes in land use and rice growing season in Korea. *Agricultural Water Management* 117: 43-54. doi:10.1016/j.agwat.2012.10.023.
30. Yoo, S. H., 2009. Analyzing agricultural drought affected by climate change. Ph.D. Diss., Seoul National University (in Korean).