creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

공학석사 학위논문

화학사고 시 강우와 누출물질의 물성에 따른 하천과 저토의 오염도 예측을 위한 다매체 동태모형 개발

2022년 2월

서울대학교 대학원

환경계획학과 환경관리전공

문 승 재

화학사고 시
강우와 누출물질의 물성에 따른
하천과 저토의 오염도 예측을 위한
다매체 동태모형 개발

지도교수 이 동 수

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함
2022년 1월

서울대학교 대학원
환경계획학과 환경관리 전공
문 승 재

문승재의 석사 학위논문을 인준함
2022년 1월

위 원 장 _____ 정 수 종 _____ (인)

부위원장 _____ 최 용 주 _____ (인)

위 원 _____ 이 동 수 _____ (인)

국문초록

국내 발생한 화학사고 중 누출에 의한 사고는 전체 사고의 약 77%로 누출사고에 대한 예방 및 대응방안 마련이 중요하다. 하지만 화학사고를 예측 및 평가하기 위해 사용되는 모형들은 주로 대기에 한정되며, 수체 오염을 평가하기 위한 모형들은 대기로부터의 오염물질 침적을 충분히 고려하지 않는다. 하지만 화학사고는 매체간의 상호작용에 의해 모든 환경 매체를 오염시킨다. 따라서, 화학사고에 의한 환경오염을 평가하기 위해서는 환경 매체 간의 상호작용을 고려하며 물질의 매체 별 동태특성을 반영한 모형이 필요하다. 또한 강우의 경우, 습식침적으로 대기에서 화학물질을 지표면으로 제거하며, 강우에 의해 토양으로 침적된 화학물질은 runoff를 통해 수체를 오염시킨다. 하지만 현재 화학사고 평가에 사용되는 일반적인 모형들은 강우 조건에 따른 매체 별 오염도 변화 평가가 불가능하다. 따라서, 본 연구에서는 대기, 토양, 수체, 저토에 대한 매체별 오염도를 정량적으로 평가할 수 있는 확장된 화학사고 다매체 동태모형(CAM)을 구현하고, 신뢰성을 인정받은 WASP8과 비교하여 수체·저토에 대한 예측력을 평가하고, 화학사고가 수체와 저토에 미치는 영향을 기상조건 시나리오들과 누출된 물질의 물성을 통해 분석하였다.

CAM의 예측력 평가 결과, WASP8과의 시공간적 예측 경향은 유사하며, 수체에 대한 예측력은 WASP8과 비교하여 적정하였다. 하지만, 저토의 경우, CAM이 WASP8보다 고평가하였다. 이는 오염물질의 K_{oc}가 낮을수록 수체-저토 간의 흡·탈착이 오염물질이 수체에서 저토로 이동하는 주 물질 이동기작으로 작용하였기 때문이다. 하지만, 수체-저토 간의 흡·탈착은 수체에 유입된 오염물질

이 매체간 이동을 하는 주 기작 중 하나로, 이를 모의하는 CAM이 WASP8보다 오염물질의 이동을 더 정교하게 모의한다는 장점으로 수용 가능하다.

CAM을 이용하여, 강우 강도, 강우 시기, 강우 지속시간, 풍향에 따른 시나리오들과 누출된 물질의 물성을 이용하여 분석하였다. 그 결과, 수체의 오염도는 K_{aw}와 반비례하나, 강우 조건에서 log K_{aw}>-3일 때, 수체의 오염도는 각 강우 요인들과 비례하지만, log K_{aw}<-4일 때, 수체의 오염도는 각 강우 요인들과 반비례하였다. 또한, log K_{aw}가 -4와 -3 사이에 위치한 물질의 경우, 강우에 따른 영향을 덜 받을 수 있다. 특히, 사고 발생 후 24시간 동안의 강우가 수체·저토 오염도에 가장 큰 영향을 미치며 풍향 또한 큰 영향을 미침을 확인하였다.

본 연구에서는 이처럼 화학사고 다매체 동태모형을 구현하였고 이를 이용해 강우 요인과 풍향, 그리고 누출된 물질의 물성에 화학사고에 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구의 결과는 향후 화학사고 예측 모형 정교화에 중요한 참고가 될 수 있으며, 또한, 향후 화학사고 영향을 사전 평가 혹은 사후 평가하는 과정에서 수체·저토 오염도 반영이 필요함을 시사한다.

주요어 : 화학사고, 누출사고, 다매체 동태모형, 하천 저토 오염, 예측
학 번 : 2019-26158

목 차

제 1 장 서론 ····· 1
제 1 절 연구배경 및 목적 ····· 1

제 2 장 선행연구의 고찰 ····· 3
제 1 절 화학사고 다매체동태모형 ····· 3

제 3 장 연구 방법 ····· 6
제 1 절 연구대상 물질 선정 ····· 6
제 2 절 연구 범위 및 사고 시나리오 선정 ····· 9
제 3 절 모형의 개발 및 평가 ····· 13

제 4 장 모형 개발 ····· 14
제 1 절 개발된 다매체 모형의 원리 ····· 14
제 2 절 모형 내 구축자료의 목록 ····· 21
제 3 절 토사유실과 지표유출 ····· 25

제 5 장 모형의 신뢰성 평가 ····· 31
제 1 절 신뢰성 평가 방법 ····· 31
제 2 절 신뢰성 평가 결과 ····· 35

제 6 장 연구 결과 및 고찰 ····· 46
제 1 절 물질과 시나리오에 따른 시공간적 변화 분석 · 46

제 7 장 결론 ····· 66
제 1 절 연구결과 요약 ····· 66
제 2 절 연구의 한계점 및 의의 ····· 68

참고문헌 ····· 69

표 목 차

<표 1> 물성에 따른 영향 평가 연구대상 물질 개요 ····· 8
<표 2-1> 강우에 따른 영향 평가 모델링 시나리오 ····· 12
<표 2-2> 비교 목적에 따른 시나리오 목록 ····· 12
<표 3-1> 모형에 추가된 대기·토양의 물질 이동 기작 ····· 18
<표 3-1> 수체 모듈에 반영된 물질 이동 기작 ····· 19
<표 3-2> 저토 모듈에 반영된 물질 이동 기작 ····· 20
<표 4> 데이터 구축에 활용된 디지털 지도 ····· 21
<표 5> 토지 이용 및 경사도에 따른 보전관리인자 ····· 29
<표 6> 화학사고 다매체모형과 WASP8 내 반영기작 ····· 33
<표 7> 화학사고 다매체모형과 WASP8의 물질에 따른
시공간적 평균 예측 농도비 ····· 37
<표 8> 화학사고 다매체모형의 물질에 따른 모형 예측 성능 지표 ···· 42
<표 9> 화학사고 다매체모형의 물질에 따른 침강 및 저토 흡탈착 flux 예측값 ··· 45
<표 10> 강우 강도에 따른 각 물질 별 평균 침적 flux ····· 47
<표 11> 강우 지속시간에 따른 각 물질 별 토양-대기 확산 net flux ····· 53
<표 12> 강우 지속시간에 따른 각 물질 별 평균 침적 flux ····· 54
<표 13> 강우 시기에 따른 각 물질 별 평균 침적 flux ····· 60

그 림 목 차

<그림 1> 13종 유기화합물의 물성 범위 ····· 7
<그림 2> 연구대상지역 범위 ····· 9
<그림 3> 화학사고 모형의 모식도 ····· 15
<그림 4> 완성된 화학사고 다매체모형의 개념도 ····· 16
<그림 5> Sink가 보정된 연구지역 DEM ····· 22
<그림 6> 연구지역 흐름방향 Grid ····· 23
<그림 7> 모형 내 연구대상 지역 지표면 격자 구성도 ····· 24
<그림 8> 토양 침식인자(K)값 산출 ····· 26
<그림 9> 토양 피복관리인자(C)값 산출 ····· 27
<그림 10> 토양 지형인자(C)값 산출 ····· 28
<그림 11> WASP8 구간 도식도 ····· 34
<그림 12> 수체-저토 간 확산 반영 여부에 따른 각 물질의 매체 별 농도 ··· 37
<그림 13> K_{oc}와 CAM의 평균 수체-저토 흡·탈착 flux ····· 47
<그림 14> 물성에 따른 강우 강도 별 오염도 ····· 47
<그림 15> 물성에 따른 각 물질의 강우 강도 별 습식침적 flux ····· 48
<그림 16> 물성에 따른 강우 강도 별 Runoff flux ····· 50
<그림 17> 물성에 따른 강우 지속시간 별 오염도 ····· 53
<그림 18> 물성에 따른 각 물질의 강우 지속시간 별 침적 flux ····· 55
<그림 19> 물성에 따른 강우 지속시간 별 Runoff flux ····· 56
<그림 20> 물성에 따른 강우 시기 별 오염도 ····· 59
<그림 21> 물성에 따른 강우 시기 별 침적 flux 변화 ····· 61
<그림 22> 물성에 따른 강우 시기 별 Runoff flux 변화 ····· 62
<그림 23> 풍향에 따른 각 물질 별 오염도 변화 ····· 65

제 1 장. 서론

제 1 절 연구 배경 및 목적

화학물질은 국내에서는 매년 300여 종 이상이 시장에 새로 진입하고 전 세계적으로는 매년 2천여 종의 새로운 화학물질이 개발되어 상품화되고 있으며, 화학물질들은 물성과 배출조건의 차이에 따라 서로 다른 환경 동태 특성을 나타낸다(MOE, 2015). '화학물질통계조사'에 따르면 2014년~2019년까지 총 506건의 화학사고가 발생했으며 그 중 388건(76.7%)이 누출에 의한 사고로 누출사고에 대한 예방 및 대응방안 마련이 중요하다.

현재 우리나라는 '화학물질관리법'에 의해 각 사업장은 화학사고의 사고 예방적 의미로서 KORA(Korea Off-site Risk Assessment supporting tool)를 사용해 '장외영향평가서' 및 '위해관리계획서'를 작성해야 하며, 사고 대응적 의미로서 CARIS(Chemical Accident Response Information System)를 사용해 화학사고 발생 후 사고 영향 거리를 평가한다. 이와 별개로 국내에서는 ALOHA, SLAB, DEGADIS, HGSYSTEM 등 다양한 예측 모형을 사용하여 화학사고 영향을 예측했다(정수희, 1999; 정경삼, 2015; 김진형 외, 2017). 하지만 예측에 사용된 모형의 경우, 주로 대기에만 한정되어 화학사고 영향 분석이 이뤄졌다는 한계점을 가진다.

수체 오염의 경우, 오염물질이 수체에 직접적으로 누출됐을 때, 수질 오염의 시공간 변화를 예측하는 수질모형과(Donigian and Imhoff, 2002; Feijtel et al., 1998; Park et al., 2008), 유역의 수문현상을 예측하는 수문모형이 있다(Yang et al., 2000; Borah and Bera, 2003, Easton et al., 2010). 하지만, 대기로 누출된 화학물질은 침적에 의해 지표면으로 이동하며 수체·저토를 오염시킬 수 있으며, 수질·수문모형들은 대기로부터의 오염물질 침적을 충분히 고려하지 않았다는 한계

점을 가진다.

실제 화학사고 사례인 미국 러브운하사건(1976), 인도 보팔 가스사고(1984), 한국 김천 페놀 폭파 사고(2008), 한국 구미 불산 가스 누출 사고(2012) 등을 살펴보면, 화학사고는 특정 매체만 오염시키는 것이 아니라 매체 간의 상호작용에 의해 대기, 수체, 토양, 저토를 동시에 오염시켰다. 따라서, 화학사고에 의한 환경 오염을 평가하기 위해서는 환경 매체 간의 상호작용을 고려하며 사고로 누출된 물질의 매체 별 동태특성을 반영한 모형이 필요하다.

모형을 통한 환경 매체들의 통합적인 평가와 더불어, 배출되는 기상조건에 따른 화학물질의 동태변화 연구 또한 중요하다. 특히 강우의 경우, 습식침적으로 화학물질을 대기에서 제거하기 때문에 이론, 실험적으로 많은 연구가 진행되었다(Mircea et al., 2000; Garrett et al., 2006; Yoo et al., 2014). 강우로 인해 대기에서 제거되어 토양 및 수체로 이동한 화학물질이 인체 건강과 환경에 미칠 수 있는 영향으로 인해 강우에 의한 습식 침적이 화학물질 동태에 미치는 영향을 이해하는 것은 중요하다(Yoo et al.,2014). 또한, 강우에 의해 대기에서 토양으로 침적된 화학물질은 토사 유출을 통해 수체로 유입될 수 있으며, 강우에 의한 대기 및 토양에서 수체로의 이동은 강우 시기에 따라 달라질 수 있다. 하지만 기존의 사고 영향 예측 모형들은 강우의 영향을 반영하는 모형이 없다는 한계점을 가진다.

따라서, 본 연구의 목적은 화학물질의 누출사고로 인한 영향이 평가되던 대기에 추가적으로 토양, 수체, 저토에서의 오염도까지 정량적으로 예측하는 화학사고 다매체 동태모형을 완성하는 것이다. 따라서 본 연구는 다음 두 가지 세부 목적을 가진다. ① 대기와 토양에 대해서 평가하는 기존의 화학사고 모형에 수체와 저토에 대해 정량적으로 평가하는 모듈을 개발 및 연결하여 대기, 토양, 수체, 저토에 대한 환경 매체별 오염도를 정량적으로 평가할 수 있는 확장된 화학사고 다매체 동태모형(이하 CAM) 구현과, ② 물질의 물성과 강우가 각 환경 매체 별 오염도에 미치는 영향을 분석하는 것이다.

제 2 장. 선행연구의 고찰

환경 매체의 오염도를 파악하기 위해 실측을 통해 파악하는 방법보다 수학적 모형을 통해 오염도를 평가하는 것은 시간과 비용 측면에서 경제적이다(Cohen, 1986). 또한, 화학물질 위해성 평가 과정 중, 노출평가를 위해서 수학적 모형을 사용할 경우 향후 발생할 수 있는 사고의 영향을 다양한 사고 조건을 고려하여 평가할 수 있다는 장점이 있다(Fryer et al., 2006).

대표적으로 화학물질 위해성 평가를 위해 사용되는 화학사고 모형의 경우 미국 에너지부(US Department of Energy, DOE)에서 화학물질 확산 및 피해 평가를 위해 가장 보편적으로 이용 가능하다고 명시한 ALOHA(USEPA et al., 1995), 미국 환경청(US Environmental Protection Agency, EPA)에서 환경영향평가에 사용을 권장하는 AERMOD 등이 있으며(USEPA et al., 2004), 국내에서는 CARIS를 통해 화학사고의 영향을 예측한다. 하지만 기존 모형들은 대기확산 모형을 토대로 개발되어 대기에 대해서만 평가 가능하며, 대기로부터 토양, 수체, 저토 등 타 환경 매체로의 화학물질의 이동을 고려하지 않는다(Hanna & Chang, 2008, Hanna et al., 2008). 또한, 같은 물질이라도 노출 경로(섭취, 피부접촉, 호흡)에 따라 위해도에 차이를 보이기에 대기의 오염도만 평가 가능한 기존의 화학사고 모형으로 화학사고를 평가하기에는 한계가 있다(신용승, 2009). 그러므로 화학물질로 인한 오염도를 통합적으로 평가하기 위해서는 여러 환경 매체의 오염도 예측이 가능한 다매체 동태모형을 사용해야 한다 (OECD, 2004).

다매체 동태모형이란 대기, 토양, 수체, 저토 등 각 환경 매체 간 화학물질의 거동으로 각 매체의 오염도를 예측할 수 있는 모형이다(OECD, 2004). 다매체 동태모형은 반영하는 프로세스와 시스템의 복잡성에 따라 Level 1 ~ Level 4까지 나눠지며 오염물질의 매체 간 비평형 및 비정상상태를 가정하여 매우 정교한 조건을 반영할 수 있는

모형인 Level 4가 제일 정교하다 (OECD, 2004).

다매체 환경을 고려하여 화학사고를 평가할 수 있는 모형으로는 화학사고 다매체 동태모형이 있다 (Lee et al., 2019). 화학사고 다매체 동태모형은 Level 4 모형으로, 대기와 토양에서의 물질 간 이동을 고려하며 기상조건의 변화를 반영하고 정량적인 시공간적 오염도를 예측할 수 있는 모형이다. 하지만, 화학사고로 누출된 화학물질은 대기와 토양에서만 이동하는 것이 아니라, 수체와 저토로 이동하여 오염시킨다. 따라서, 진정한 의미에서의 화학사고 다매체 동태모형을 위해선, 이미 모형에서 다루는 환경 매체인 대기와 토양에 추가적으로 수체와 저토까지 평가가 가능하도록 추가적인 확장 및 개발이 필요하다.

모형의 확장 및 개발과 더불어, Pandya et al.(2012)은 모형 내부의 변수보다 배출조건 변수가 모형 예측 결과에 영향을 미치는 정도가 더 크다고 평가하였다. 배출조건 변수 중, 습도를 제외한 대기안정도, 온도, 풍속 같은 변수들이 확산 거리에 영향을 미친다고 알려져 있으며(Zhu et al., 2013), 누출공의 직경 및 위치 또한 확산 거리에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Hanna et al., 2008). 또한, 배출조건 변수가 모형에 미치는 영향 정도는 물질의 물성에 영향을 받으며 (Bubbico et al., 2008), Kim et al.(2018)은 물성을 바탕으로 화학물질이 토양에 가지는 위해성을 모형으로 평가하여 사전에 활용할 수 있게 제시한 바 있다. 하지만, 선행연구들은 화학사고가 수체·저토에 미치는 영향을 고려하지 않았으며, 배출조건 중 강우가 미치는 영향에 관해서는 연구가 부족하다는 한계점을 가진다.

대기로 누출된 물질은 강우로 인해 습식침적이 발생하며, 대기로 누출된 화학물질은 토양 및 수체로 유입된다(Mircea et al., 2000). 습식 침적은 입자상 물질의 세정과 가스상 물질의 세정으로 나뉘어지며, PAHs, PCBs, Dioxins이 입자상 물질의 세정 효율이 가스상 물질의 세정에 비해 더 큰 것으로 나타난다 (Ligocki et al., 1985a.b; Duinker & Bouchertall, 1989; Dickhut & Gustafson, 1995). 또한, 강

우로 인해 토양에서의 침식, 유출이 발생해 화학물질은 수체로 유입된다 (Lal, 2001). 따라서, 사고로 누출된 물질의 물성과 강우 요인에 따른 화학물질의 시공간적 농도 변화를 평가하는 것은 화학사고가 환경에 미치는 영향을 이해하기 위해 중요하다고 예측된다.

제 3 장. 연구 방법

제 1 절 연구대상 물질 선정

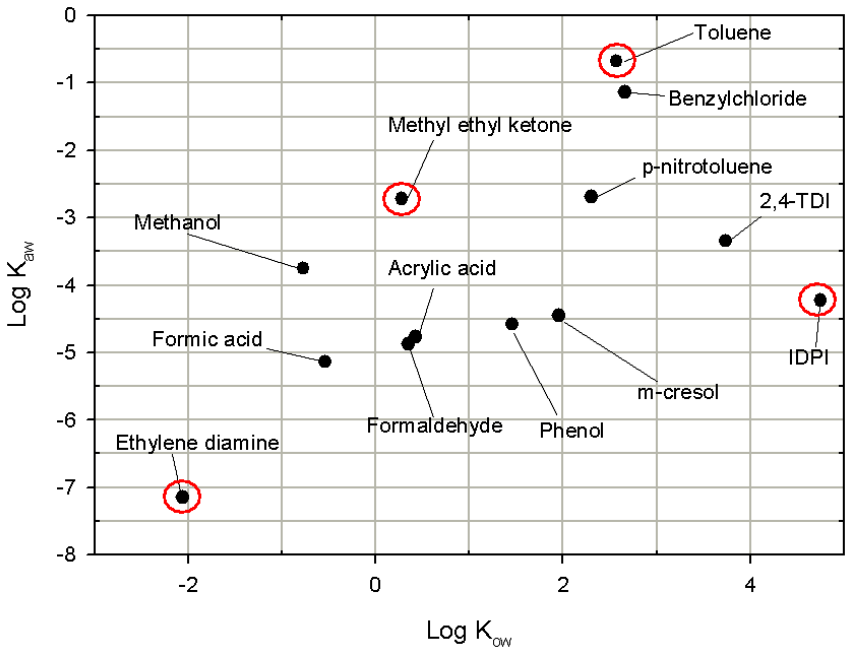
CAM에서 평가할 연구대상 물질을 선정하기 위해, 기존의 화학사고 모형에서 다루는 물질들에서 사고대비물질이며 환경 잔류성이 높은 13종의 유기화합물을 일차적으로 선정하였다.

강우에 의해 대기로 누출된 오염물질은 습식침적을 통해 지표면으로 이동하며, 토양에서는 토사유실과 지표유출을 통해 이동한다. 따라서, 물질을 선정하는 물성 기준은 ① 강우에 의한 대기-지표 매체 간 물질 이동(습식침적)을 고려하여야 하며, ② 강우로 인해 유발된 토양으로부터의 유출(토사유실, 지표유출)을 고려할 수 있어야 한다.

분배계수의 경우, 화학물질의 이동, 분배, 그리고 자연환경에서의 유기오염물질의 축적을 평가하는 데 있어 중요한 물성이다(Xu and Kropscott, 2014).

분배계수 중, Air-water partition coefficient(K_{aw})의 경우, 강우에 의한 대기-수체 간 물질 이동인 습식침적 중 가스상 물질의 세정(gas scavenging), 휘발 등을 비롯한 공기와 물 사이의 평형 분배를 예측하는 데 사용된다(Mackay, 2001). Octanol-water partition coefficient (K_{ow})의 경우, 습식 침적 중 입자상 물질의 세정(particle scavenging), 유기 분자의 소수성(Leo et al., 1971), 유기 물질에 대한 흡착 정도를 예측하는데 사용된다(Sabljic et al., 1995).

따라서, 습식침적을 평가하기 위한 물성으로 K_{aw}와 K_{ow}, 토사유실·지표유출을 평가하기 위한 물성으로 K_{ow}를 선정하였다. 선정된 물성 기준인 K_{aw}와 K_{ow}에 따른 13종 유기화합물의 물성 범위는 <그림 1>에 나타냈다.



<그림 1> 13종 유기화합물의 물성 범위

<그림 1>에 나타낸 물성 범위를 토대로 넓은 범위의 K_{ow}와 K_{aw}를 반영한 물질 4가지(Ethylenediamine, Isophorone diisocyanate(IDPI), Methyl ethyl ketone(MEK), Toluene)를 선정하였으며, 각 물질의 물성을 다음 <표 1>에 나타냈다.

<표 1> 물성에 따른 영향평가 연구대상 물질 개요

Substance	Ethylene diamine (ED)	Isophorone diisocyanate (IDPI)	Methyl ethyl ketone (MEK)	Toluene
Molecular Weight (g/mol)	60.1	222.3	72.11	92.14
Boiling point (K)	389	431	352.6	383.8
Melting point (K)	281	213	186.4	178.1
Log K_{ow}	-2.06	4.75	0.28	2.57
Log K_{aw}	-7.15	-4.22	-2.72	-0.68
Molar volume (cm^3/mol)	10.7	156	89.9	118.2
Vapor pressure (Pa)	1,300	0.04	12,079	3,766
Henry's constant (Pa • m^3/ mol]	1.75E-04	0.15	4.7	518
Solubility (mg/L)	1.0E+6	1,000	2.11E+5	526
RxOHAir	5.92E-12	8.82E-12	5.92E-12	6.19E-12
RxW	1.16E-02	1.30E-03	1.16E-02	1.30E-03
RxSoil	1.16E-03	5.78E-03	1.16E-03	5.78E-03
RxSed	1.16E-04	5.78E-04	1.16E-04	5.78E-04
RxVeg	1.16E-04	5.78E-04	1.16E-04	5.78E-04

제 2 절 연구 범위 및 사고 시나리오 선정

본 연구의 목적 중 하나는 화학물질의 물성과 강우 조건에 따른 화학사고로 인한 매체 별 오염도의 변화를 예측하는 것이므로 먼저 가상의 사고지점을 설정하였다. 가상의 사고지점 선정기준은 다음과 같다; ① 화학사고에 의한 수체와 저토에서의 오염도를 평가하기 위해 사고지점 주변에 수체가 존재할 것, ② 실제 화학사고가 발생 이력이 존재한 지역일 것.

따라서 2014~'2021년까지 실제 화학사고 세 건이 발생했으며, 낙동강이 위치한 경상북도 구미시 공단1동을 선정하였다(<그림 2>) 또한, 기존 화학사고 모형에서 다루는 평가 지역의 범위는 15km×15km로 가상의 사고지점(444985.0, 3996774.0, UTM단위)을 중심점으로 포함한 범위를 <그림2>에 표시하였다.

<그림 2> 연구대상 지역 범위

연구의 시간적 범위를 선정하기 위해, 화학물질종합정보시스템에서 제공하는 2014년 3월부터 2020년 2월까지 약 5년간 사고 통계를 참고했다. 통계상 사계절 중 여름에 화학사고가 가장 많이 발생하였으며(전체 화학사고 중 34.1%), 여름철 강수량이 연 강수량의 54%를 차지하므로 화학사고가 가장 많이 발생하고 강우의 영향을 가장 잘 파악할 수 있는 여름철을 사고 배경 계절로 선정했다.

화학물질 누출량과 시간은 한국산업안전보건공단(2016)의 '최악 및 대안의 누출 시나리오 선정에 관한 기술'의 최악의 시나리오를 참고하여, 사고 발생 후 10분 이내에 화학물질이 전량 누출되는 것으로 설정하였다.

화학사고 다매체 동태모형을 구동할 시나리오의 기상자료를 위해 해당 연구 지점의 2010년부터 2020년까지의 1시간 단위 Automated Synoptic Observing System(ASOS)의 여름철(6~8월) 데이터를 분석하였다. 연구지역이 15km×15km로 연구지역 내 다른 기상이 나타날 수 있음에도 불구하고 단일 기상 값을 모형에 사용한 이유는 다음과 같다. ① 본 연구의 목적은 물성과 강우가 화학사고에 미치는 영향 분석이다. 하지만 시공간적으로 변하는 기상 값의 사용은 결과에 대한 추가적인 영향요인으로 작용하여 분석이 불필요하게 복잡해지는 점, ② 기상청의 자동기상관측장비를 통한 관측 조밀도는 약 13km이며 연구지역에는 각각 1개의 ASOS와 AWS 지점만 있어 고해상도의 기상 자료를 이용하기 어려운 점, ③ EPA가 환경영향평가에 사용을 권장하고 국내에서도 환경영향평가를 위한 대기오염도 예측에 사용되는 AERMOD의 경우, 최대 50km 범위에 대해서 평가하지만 평가 지역에 대한 단일 기상값을 사용한다는 점이다. 위 세 가지 이유로 모형 내 기상 값을 시공간 단일 값으로 사용했다.

강우에 따른 영향평가를 하기 위한 요인으로 강우의 유무, 강우 강도, 강우 지속기간, 사고 시점으로부터의 강우 시기를 선정하였다. 또한, 수체 농도의 경우, 풍향에 의해 다르게 나타날 수 있다. 따라서, 풍향에 따른 영향을 평가하기 위해, 사고 발생 시 풍향이 수체 방향

일 경우와 풍향이 수체 반대 방향일 경우에 따른 영향을 비교했다.

네 개의 연구물질 각각에 대해 선정된 요인을 반영하는 시나리오 10개를 <표 2-1>처럼 구성하여 총 40개의 시나리오를 평가했으며, <표 2-2>에 비교 목적에 따른 시나리오 목록을 나타냈다.

<표 2-1> 강우에 따른 영향평가 모델링 시나리오

항목	값			
사고 발생 시점	경상북도 구미시 공단1동 (444985.0, 3996774.0, UTM단위)			
누출량	100 ton			
누출 시간	600 sec			
질량누출속도	166.67 kg/sec			
시나리오	강우 지속기간 (hr)	강우 강도 (mm/hr)	강우 시기 (day)	풍향
1	0	0	0	하천 방향
2	15	1.5	0	하천 방향
3	15	10	0	하천 방향
4	15	20	0	하천 방향
5	30	10	0	하천 방향
6	45	10	0	하천 방향
7	15	20	1	하천 방향
8	15	20	10	하천 방향
9	15	20	20	하천 방향
10	45	10	0	하천 방향

<표 2-2> 비교 목적에 따른 시나리오 목록

목적	항목	시나리오	값
강우 강도의 영향	강우 강도 (mm/hr)	1	0
		2	1.5
		3	10
		4	20
강우 지속기간의 영향	강우 지속기간 (hr)	3	15
		5	30
		6	45
강우 시기의 영향	강우 시기 (day)	4	0
		7	1
		8	10
		9	20
풍향의 영향	풍향	6	하천 방향
		10	하천 반대 방향

제 3 절 모형의 개발 및 평가

기존에 개발된 대기와 토양에 대해 평가가 가능한 화학사고 다매체 모형에 컴퓨터 프로그램 언어인 FORTRAN을 활용하여 수체, 저토 모듈을 연결시키고 모형 구조를 수체와 저토가 반영되게끔 수정하였다. 모형 내 지리정보자료는 QGIS로 구축되었다.

개발된 모형의 신뢰성 평가를 위해서는 흔히 측정값과의 직접적 비교를 통해 이뤄진다. 하지만 본 연구에서는 실측치와의 직접 비교가 힘들기에 동일한 비정상상태 모형이고 수체·저토에 대해 평가 가능한 United States Environmental Protection Agency(USEPA) 개발되어 사용되는 WASP8과의 시공간적 비교를 통해 CAM의 신뢰성을 평가하였다.

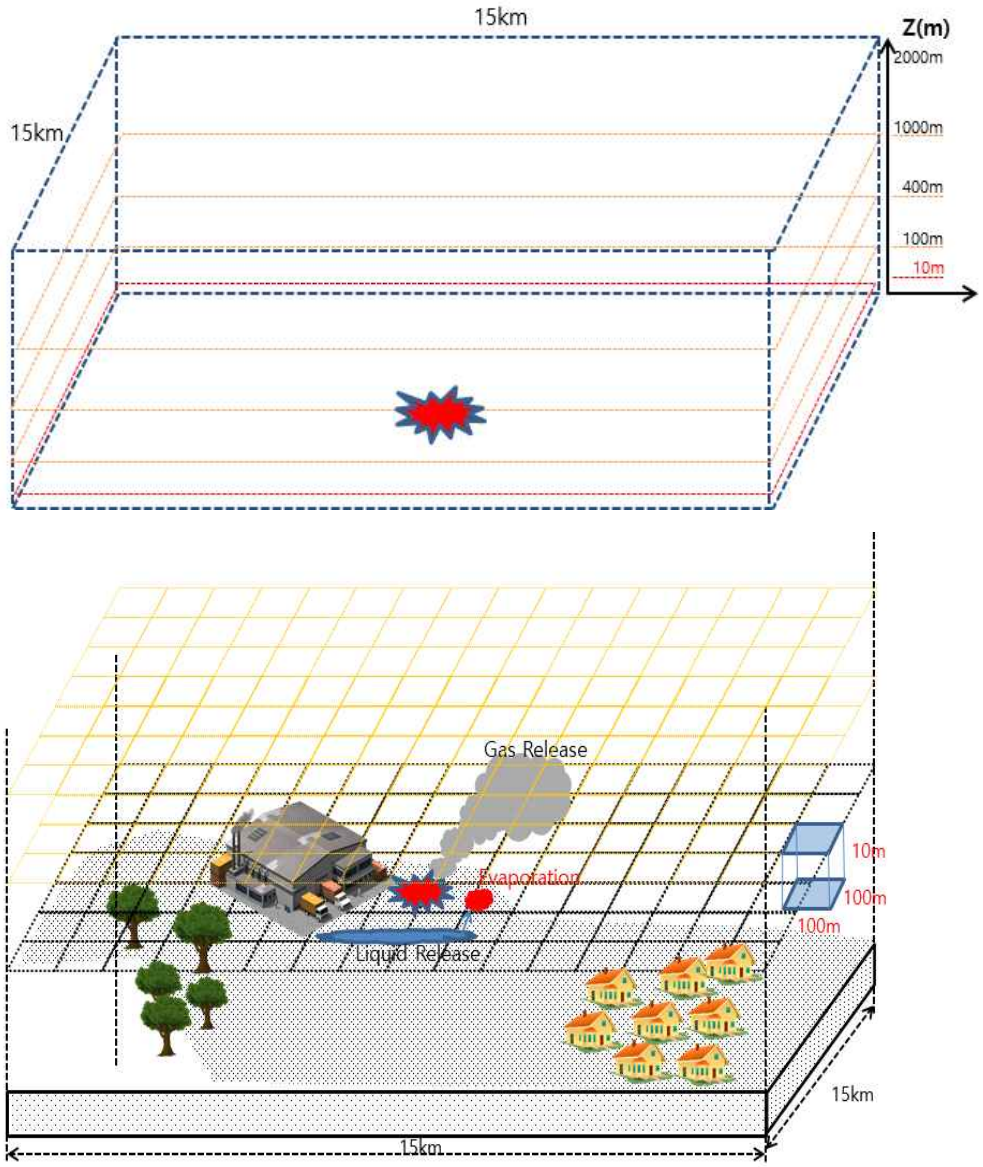
구현된 CAM을 활용하여 Ethylenediamine, IDPI, MEK, Toluene에 대해 각각 10개의 사고 시나리오를 바탕으로 예측 결과를 도출하였다. 도출된 결과를 토대로 각 물질의 시나리오에 따른 시공간적 비교를 통해 물질의 물성과 강우가 화학물질의 누출사고로 인해 발생한 수체와 저토 오염도에 미치는 영향을 분석하였다.

제 4 장. 모형 개발

제 1 절 개발된 화학사고 다매체동태모형의 원리

본 연구에서 개발되는 화학사고 다매체동태모형의 원형인 기존의 화학사고 모형은 대기와 토양에 대해 시공간적 오염도 변화를 예측할 수 있으며, 기상조건의 변화를 반영하는 비정상상태를 가정한 Level 4 모형이다 (Lee et al., 2019). 화학사고 모형은 1시간 단위의 시간해상도로 대기에서 15km×15km×2km(x, y, z)의 영역에 대한 평가가 가능한 격자모형으로 100m×100m의 수평 해상도를 가지며 수직 해상도는 10m의 해상도를 가진다 (<그림 3> 참조). 토양에서는 15km×15km 영역에 대해 평가가 가능하며 대기와 동일한 수평 해상도를 가진다.

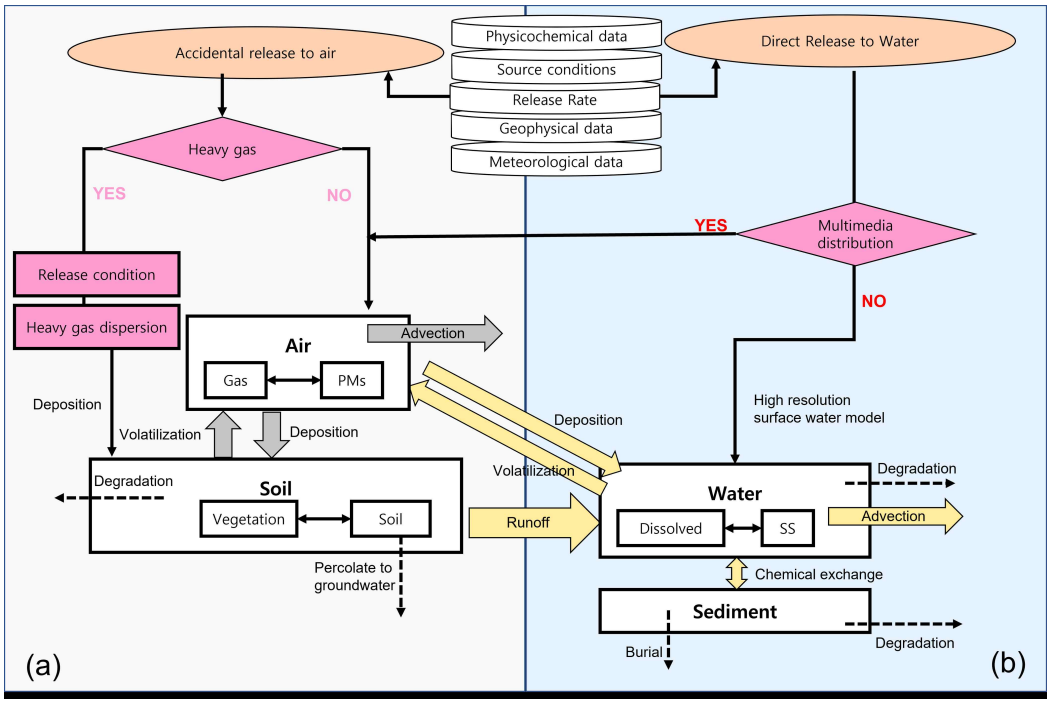
기존 모형에서 반영한 대기와 토양에서의 주요 물질 이동 프로세스로는 다음과 같다. 대기의 경우, ① 이류와 난류 확산을 통한 오염물의 격자 간 이동, ② 가스상-입자상 분배, 분해 및 지표 토양 및 수체로 이동하는 건·습식 침적을 통한 대기 중 제거, ④ 지표 매질로 유입된 오염물의 휘발 등이 고려되어 있다. 토양의 경우, ① 대기로부터 유입된 오염물의 휘발, ② 지하수로의 침출, ③ 토양 내 분해, ④ 강우로 인한 강우 유출 및 토사 유출에 의한 오염물의 지표수로의 이동 등이 고려되었다.



<그림 3> 화학사고 모형의 모식도
(Lee et al., 2019)

본 연구에서는 기존의 화학사고 모형에서 평가하지 않던 수체와 저토 환경 매체에서의 오염도를 평가한다. 따라서, 기존 화학사고 모형의 평가 영역인 15km X 15km(x,y) 범위 내 수체·저토 격자들은 100m X 100m(x,y)의 수평해상도를 가지고, 수체와 저토 각각의 깊이에 따른 z 값을 사용자가 임의로 조정할 수 있는 3차원 격자로 개발하였

다. 또한, 대기-수체, 토양-수체, 수체-저토 간의 발생하는 물질 이동 프로세스를 반영한 모듈을 개발하고 기존의 모형에 연결하여 수체와 저토에 대한 정량적인 오염도 평가가 가능하도록 하였다 (<그림 4> 참조).



<그림 4> 확장된 화학사고 다매체 동태모형의 개념도
((a):기존 화학사고 모형, (b): 연결된 수체·저토 모듈과 추가된 대기·토양의 물질 이동 기작)

모형 내 대기와 토양에서 추가적으로 반영한 프로세스는 다음과 같다. ① 대기에서 수체로의 건·습식 침적, ② 대기에서 수체로의 확산, ③ 토양에서 수체로의 토사 유출, ④ 토양에서 수체로의 강우 유출이 반영되었다 (<표3-1> 참조).

수체와 저토 모듈에서 반영한 물질 이동 프로세스는 다음과 같다. 먼저 수체의 경우, ① 유입된 오염물의 휘발, ② 수체 내 이류로 인한 오염물의 제거, ③ 오염물의 침강과 재부유, ④ 수체 내 분해, ⑤ 저

토와의 탈착과 흡착을 반영하였다 (<표3-2> 참조). 저토에서는 ① 저토 내 분해, ② 저토 내로 오염물의 매장(Burial)을 반영하였다 (<표3-3> 참조).

<표 3-1> 모형에 추가된 대기·토양의 물질 이동 기작

Media	Process	Equation	Description
Air	습식침적 (1/h) (k_{PWet})	$\Phi \cdot J_{rain} \cdot \Lambda_{rain} \cdot A_{aw} \cdot V_{air}$	Φ: fraction of a chemical sorbed on PMs (dimensionless) J_{rain}: precipitation rate(m/h) Λ_{rain}: particle scavenging ratio (the ratio of the average pollutant concentration in the falling rain to the pollutant concentration in the air phase) (dimensionless) A_{aw}: Water surface area(m^2) V_{air}: volume of air compartment(m^3)
	습식침적 (1/h) (k_{GWet})	$(1-\Phi) \cdot J_{rain} \cdot \Lambda_g^* \cdot \frac{1}{K_{aw}} \cdot \frac{A_{aw}}{V_{air}}$	K_{aw}: air-water partition coefficient (dimensionless) Λ_g^*: normalized gas scavenging ratio, (dimensionless)
	건식침적 (1/h) (k_{PDry})	$\Phi \cdot V_{PDry} \cdot \frac{A_{aw}}{V_{air}}$	V_{PDry}: dry deposition velocity of particle (m/h)
	확산에 의해 대기에서 수체로 이동하는 제거 속도상수 (1/h) (k_{DiffW})	$(1-\Phi) \cdot k_{Oas} \cdot \frac{A_{aw}}{V_{air}}$	k_{Oaw}: overall mass transfer coefficient between air and water(m/h)
Soil	토사 유출에 의한 토양에서의 제거 속도상수 (1/h) (k_{SRO})	$U_{SRO} \cdot \frac{1}{K_{smsp}} \cdot \frac{A_{as}}{V_{soil}}$	U_{SRO}: solid runoff rate(m/h) K_{smsp}: soil matrix-soil solid partition coefficient (dimensionless) A_{as}: soil surface area(m^2) V_{soil}: volume of soil compartment(m^3)
	강우 유출에 의한 토양에서의 제거 속도상수 (1/h) (k_{WRO})	$U_{WRO} \cdot \frac{1}{K_{smsw}} \cdot \frac{A_{as}}{V_{soil}}$	U_{WRO}: solid runoff rate(m/h) K_{smsw}: soil matrix-soil water partition coefficient (dimensionless)

<표 3-2> 수체 모듈에 반영된 물질 이동 기작

Media	Process	Equation	Description
Water	Overall	$\frac{dC_{water}}{dt} = AdvectiveInflow - AdvectiveOutflow + (k_{PWet} + k_{GWet} + k_{PDry} + k_{DiffW})C_{air} + (k_{SRO} + k_{WRO})C_{soil} + (k_{desorpsed} + k_{resus})C_{sed} - (k_{volw} + k_{adsSed} + k_{RXwater} + k_{SSDepo})C_{water}$	
	수체에서 대기로 휘발 (1/h) (k_{volw})	$k_{Oaw} \cdot \left(\frac{1}{1+K_{pss}}\right) \cdot \left(\frac{A_{aw}}{V_w}\right)$	K_{pss}: SS-water partition coefficient, dimensionless V_w: volume of water compartment(m^3)
	수체에서 저토로 흡착 (1/h) ($k_{adsorpsed}$)	$k_{Owsed} \cdot \left(\frac{1}{1+K_{pss}}\right) \cdot \left(\frac{A_{wsed}}{V_w}\right)$	k_{Owsed}: water-side overall mass transfer coefficient at water-sediment interface(m/h) A_{wsed}: Sediment surface area(m^2)
	수체에서의 분해 (1/h) ($k_{RXwater}$)	$k_{RXdiss} \cdot \left(\frac{1}{1+K_{pss}}\right) + k_{RXss} \cdot \left(\frac{K_{pss}}{1+K_{pss}}\right)$	k_{RXdiss}: dissolved degradation rate(1/h) k_{RXss}: SS degradation rate(1/h)
	부유물질의 저토 침강 (1/h) (k_{SSDepo})	$U_{SSDepo} \cdot \left(\frac{K_{pss}}{1+K_{pss}}\right) \cdot \left(\frac{A_{wsed}}{V_w}\right)$	U_{SSDepo}: SS deposition rate(m/h)
	저토에서 수체로 탈착 (1/h) ($k_{desorpsed}$)	$k_{Owsed} \cdot \left(\frac{1}{K_{sdmsdw}}\right) \cdot \left(\frac{A_{wsed}}{V_{sed}}\right)$	K_{sdmsdw}: sediment matrix-sediment water partition coefficient, dimensionless V_{sed}: volume of sediment compartment(m^3)
	저토에서 수체로 재부유 (1/h) (k_{resus})	$U_{resus} \cdot \left(\frac{1}{K_{sdmsdp}}\right) \cdot \left(\frac{A_{wsed}}{V_{sed}}\right)$	U_{resus}: sediment resuspension rate(m/h) K_{sdmsdp}: sediment matrix-sediment solid partition coefficient, dimensionless

<표 3-3> 모형에 반영된 저토 내 물질 이동 프로세스

Media	Process	Equation	Description
Sediment	Overall	$\frac{dC_{sed}}{dt} = (k_{adsorpsed} + k_{SSDepo})C_{water} - (k_{desorpsed} + k_{resus} + k_{RXsed} + k_{burial})C_{sed}$	
	수체에서 저토로 흡착 (1/h) ($k_{adsorpsed}$)	$k_{owsed} \cdot \left(\frac{1}{1+K_{pss}}\right) \cdot \left(\frac{A_{wsed}}{V_w}\right)$	
	부유물질의 저토 침강 (1/h) (k_{SSDepo})	$U_{SSDepo} \cdot \left(\frac{K_{pss}}{1+K_{pss}}\right) \cdot \left(\frac{A_{wsed}}{V_w}\right)$	
	저토에서 수체로 탈착 (1/h) ($k_{desorpsed}$)	$k_{owsed} \cdot \left(\frac{1}{K_{sdmsdw}}\right) \cdot \left(\frac{A_{wsed}}{V_{sed}}\right)$	
	저토에서 수체로 재부유 (1/h) (k_{resus})	$U_{resus} \cdot \left(\frac{1}{K_{sdmsdp}}\right) \cdot \left(\frac{A_{wsed}}{V_{sed}}\right)$	
	저토에서 분해 (1/h) (k_{RXsed})		
	저토 아래로 매장 (1/h) (k_{burial})	$U_{burial} \cdot \left(\frac{1}{K_{sdmsdp}}\right) \cdot \left(\frac{A_{wsed}}{V_{sed}}\right)$	U_{burial}: sediment burial rate(m/h)

제 2 절 모형 내 구축자료의 목록

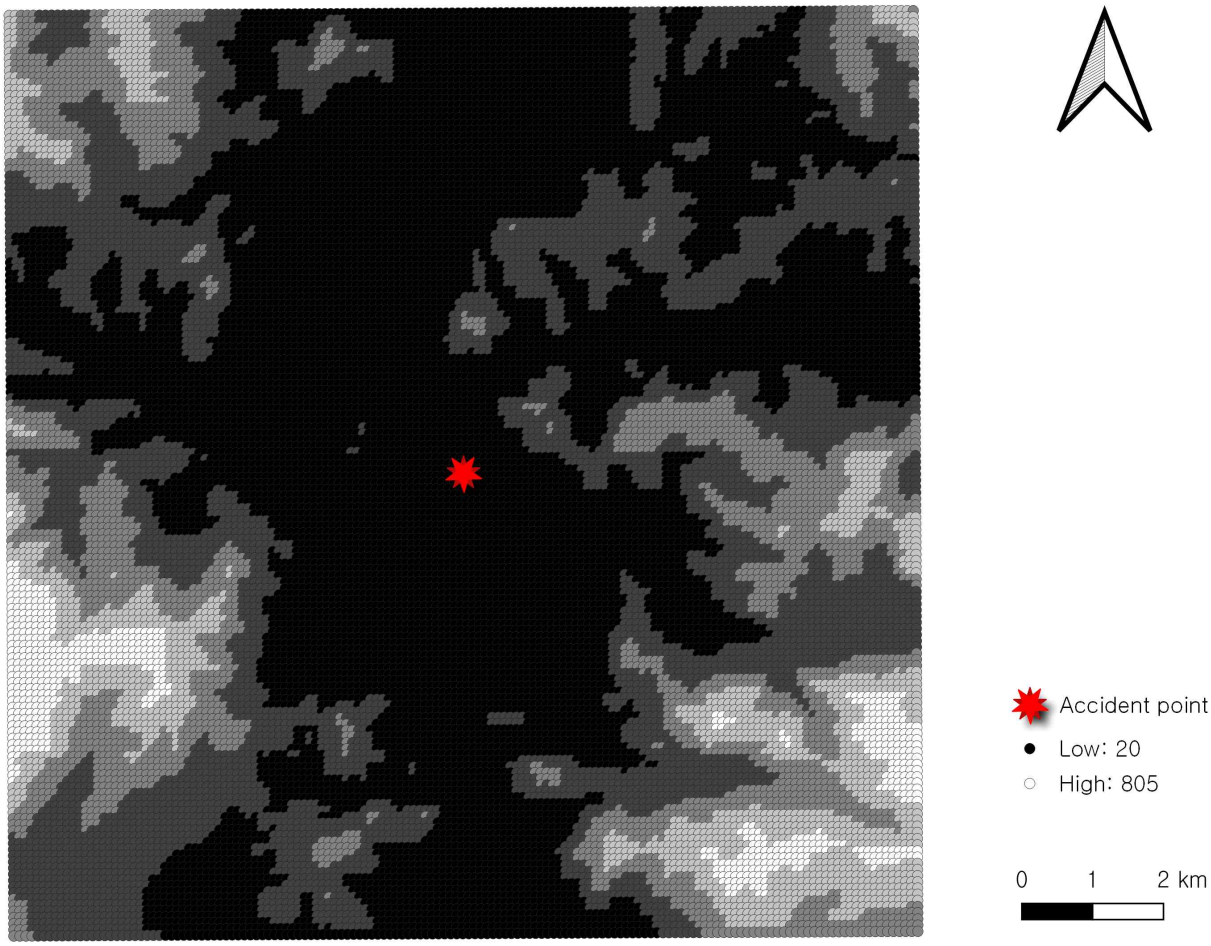
CAM의 격자 구성 및 격자 입력자료를 구축하기 위해 지리정보체계(Geographic Information System, GIS)를 활용하여 <표 4>에 표시된 수치표고 자료, 정밀토양도, 토지 피복도 3종류의 지도를 분석하였으며, 각 수치 지도의 공간적 범위는 연구지역과 동일하게 하였다.

<표 4> 데이터 구축에 활용된 디지털 지도

종류	내용	출처
지형	90m×90m 1” digital elevation model	수치표고 자료(1:25,000)
토양	90m×90m 벡터형식	정밀토양도(1:25,000)
토지 피복	30m×30m 벡터형식	토지 피복도(1:25,000)

1) DEM 보정

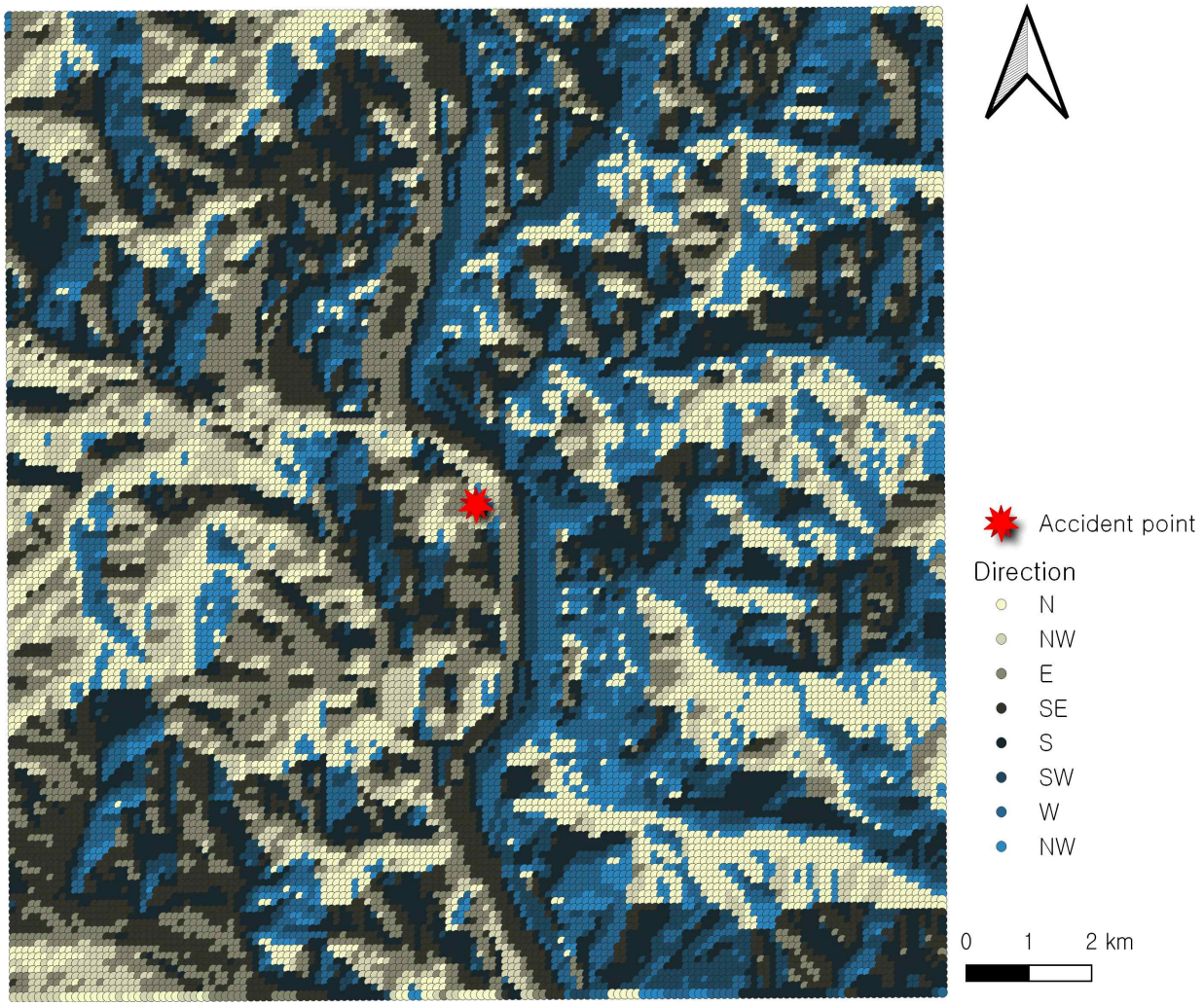
CAM에서 토사·강우 유출 및 하천의 흐름을 모의하기 위해 격자마다 DEM 데이터를 일치시켰다. 하지만 DEM에는 주변 셀보다 낮은 지형(sink)에 의해 오류가 생기며 이러한 오류는 모형 내 원활한 흐름을 방해한다. 따라서, DEM의 오류를 최소화하여 모형 내 흐름을 원활하게 모의하기 위해 QGIS내 Fill sinks(wang&liu)를 통하여 Sink를 보정하였다 (Wang and Liu, 2007). <그림 5>은 sink가 보정된 연구지역의 DEM을 나타낸다.



<그림5> Sink가 보정된 연구지역 DEM

2) 흐름 방향(Flow direction) Grid 생성

지표면에 대해 수문학적 특성을 반영하기 위해 보정된 DEM 자료를 토대로 QGIS 내 Fill sinks(wang&liu)의 Flow Direction의 흐름방향 정의 기능을 활용하여 분석하였다(Wang and Liu, 2007). Flow Direction의 흐름방향의 경우, Eight direction pour point model을 따른다 (Maidment, 2002). Eight direction pour point model에서 하나의 격자에서의 방향은 8개인데 해당 격자가 가진 고도 값과 인접 격자의 고도 값을 비교 후 방향을 정한다. 즉, 제일 낮은 고도 값을 가진 격자 방향으로 유출 및 흐름이 진행된다. <그림 5>에서 보정된 DEM을 토대로 Flow Direction을 실행한 결과 다음 <그림 6>처럼 연구지역의 흐름 방향 Grid를 구축하였다.

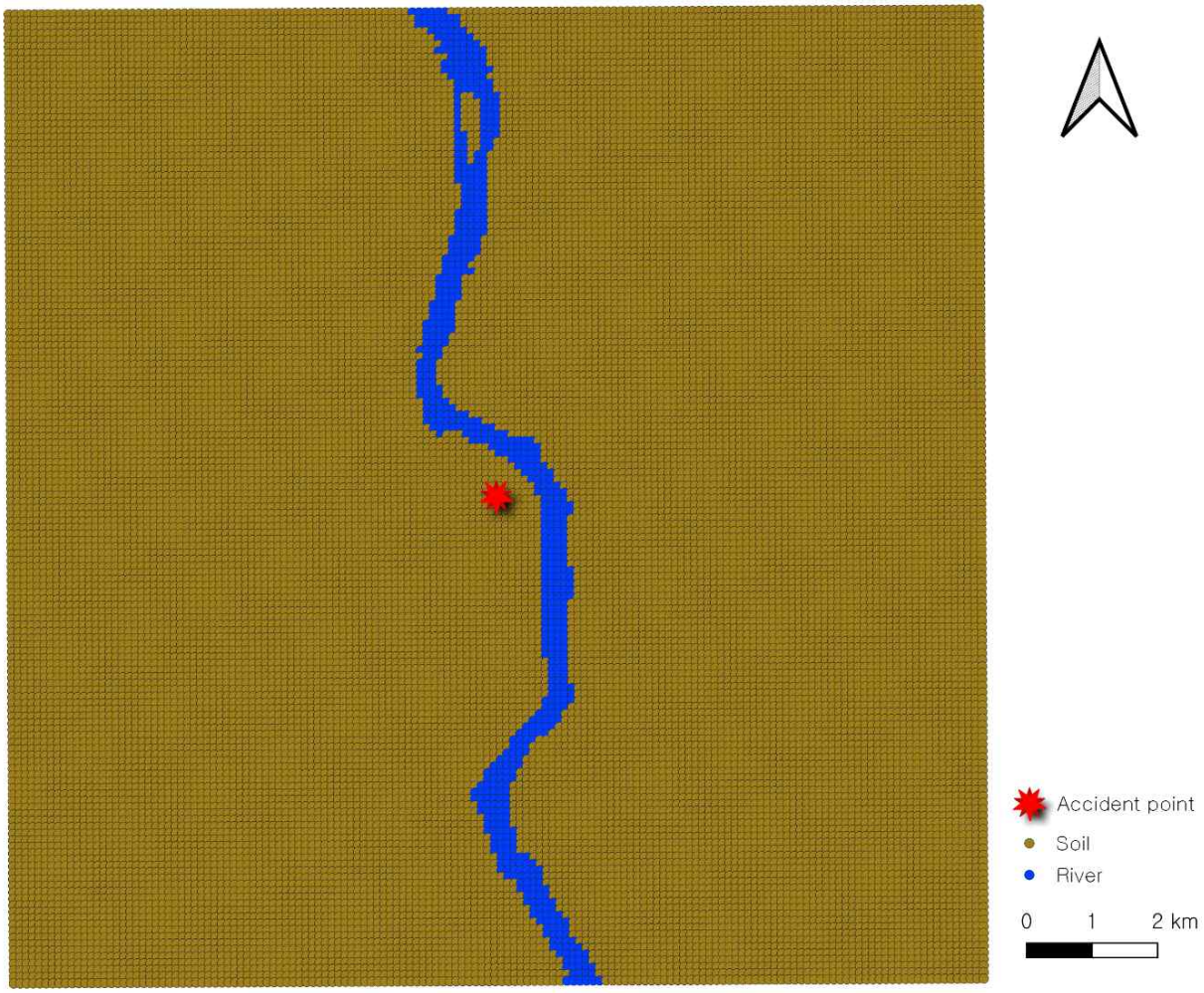


<그림 6> 연구지역 흐름 방향 Grid

3) 수체·토양 격자 구분 분석

수치지형도를 토대로 모형 내 수체와 토양 격자를 구성하였다. 해당 연구지역에는 낙동강 본류를 제외하고 추가적으로 4개의 지천이 존재한다. 지천들의 경우, 평균 너비가 400m인 낙동강에 비해 평균 너비가 10, 20, 40m로 상대적으로 작다. 이 중, 낙동강 본류의 경우, 화학사고 지점에서 동쪽으로 약 0.5km 떨어진 매우 인접한 거리에 위치하기 때문에, 낙동강 본류만 반영하여 격자를 구성하였다. 그 결과, 반영된 모형 내 격자 구조는 격자 하나의 크기가 100m×100m(x,y)이며, 토양 격자가 21786개, 수체 격자가 714개로 구성되었으며, 저토 격자는 수체 격자의 수와 동일하다. 또한, 수체 격자들의 깊이(z)는 낙동강의 평균수심을 반영하였다(KEI, 2009). 또한, 수체-저토 간 물질이동기작은 저토의 표층 5cm 안에서 일어나며(Mackay 1991), 기존의 다매체 동태모형들이 한반도에 대해 2cm로 반영하여 평가했다는 점

을 고려하여 저토의 깊이(z)는 2cm로 반영하였다(이윤아, 2005; Jung et al., 2014; 장리아, 2019). 모형 격자 구성도는 다음 <그림 7>과 같다.



<그림 7> 모형 내 연구대상 지역 지표면 격자 구성도

제 3 절 토사유실과 지표유출

토양에서 수체로 오염물이 유입되는 물질 이동 기작인 Runoff는 Solid Runoff(토사유실)와 Water Runoff(지표유출)로 나눠진다. 기존의 대기와 토양에 대해서만 평가하는 화학사고 모형의 경우, 토사유실량과 지표유출량의 시공간적 변화를 고려하지 않은 상수로 지정하여 활용하였다. 하지만 이는 토양에서 수체로 유입되는 오염물질의 양을 정교하게 묘사하기에는 부족하다. 따라서, 토양에서 수체로 유입되는 오염물의 양을 정교하게 계산하는 데 필요한 자료를 각 격자 내 데이터로 구축하여, CAM이 토사유실량과 지표유출량의 시공간적 변화를 모의할 수 있도록 개발하였다.

1) 토사유실

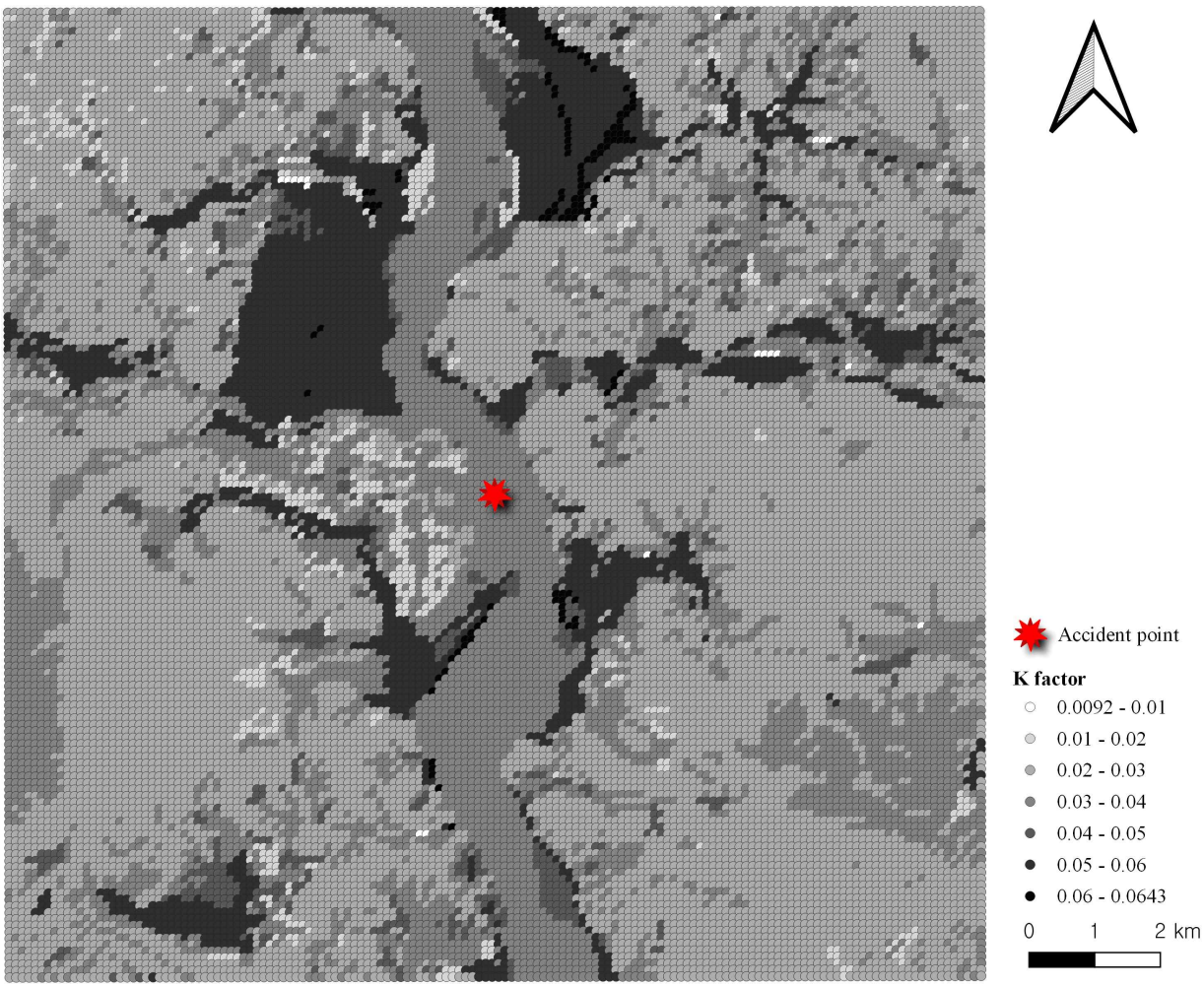
USLE(Universal Soil Loss Equation)는 강우인자, 토양침식인자, 지형인자, 피복관리 인자, 침식조절 인자로 총 토양환경보전법에 의거 표토의 침식량을 산정하는데 사용된다. 따라서, 토양유실량을 측정하기 위해 USLE을 사용하였으며 다음과 같이 인자들을 산출하였다.

(1) 강우 침식 인자 (R factor) 산출

강우 침식 인자는 강우에 의한 침식능력을 뜻한다. 강우 침식 인자는 연평균 강우 침식 인자와 단일 호우 침식 인자로 구분되며 본 연구에서는 단일 호우 침식 인자를 사용하였다. 강우 발생 초기에는 강우가 지면에 흡수되는데, 박찬원 등(2011)은 강우 침식 인자 계산을 위해 강우량이 12.7mm 이상일 때를 강우사상으로 정의한다. 따라서 본 연구에서는 강우량이 12.7mm 이상일 때를 강우사상으로 정의하며 이 때의 강우 운동 에너지를 계산하여 침식인자를 산정하였다.

(2) 토양침식 인자(K factor) 산출

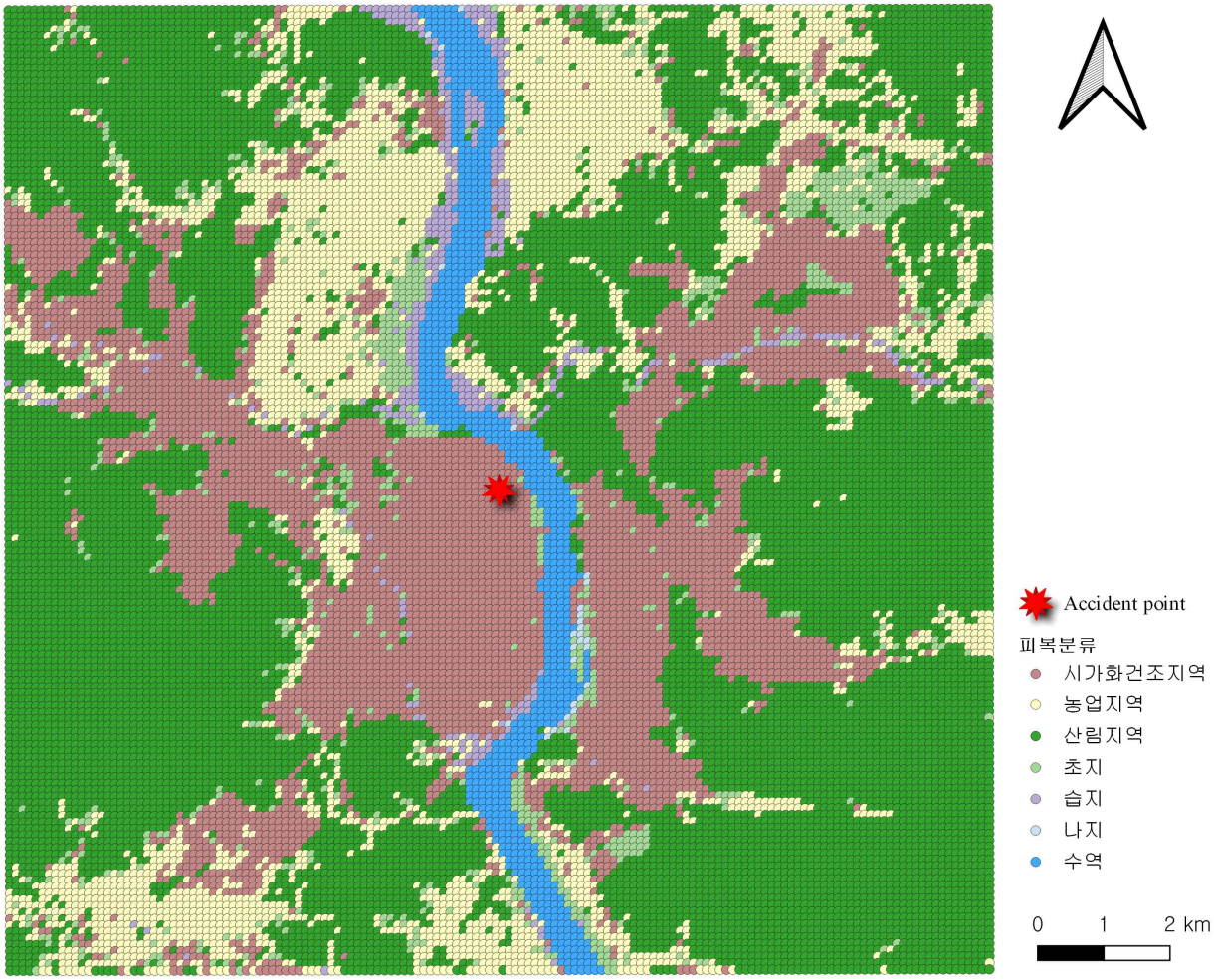
토양침식 인자는 토양의 침식에 대한 토양 표면의 저항척도를 뜻한다. 토양침식 인자는 흙토람(https://soil.rda.go.kr/)에서 제작한 정밀토양도를 이용하였다. 격자 내 데이터로 구축된 정밀토양도의 K값을 다음 <그림 8>에 나타내었다.



<그림 8> 토양 침식 인자(K)값 산출

(3) 피복관리 인자(C factor) 산출

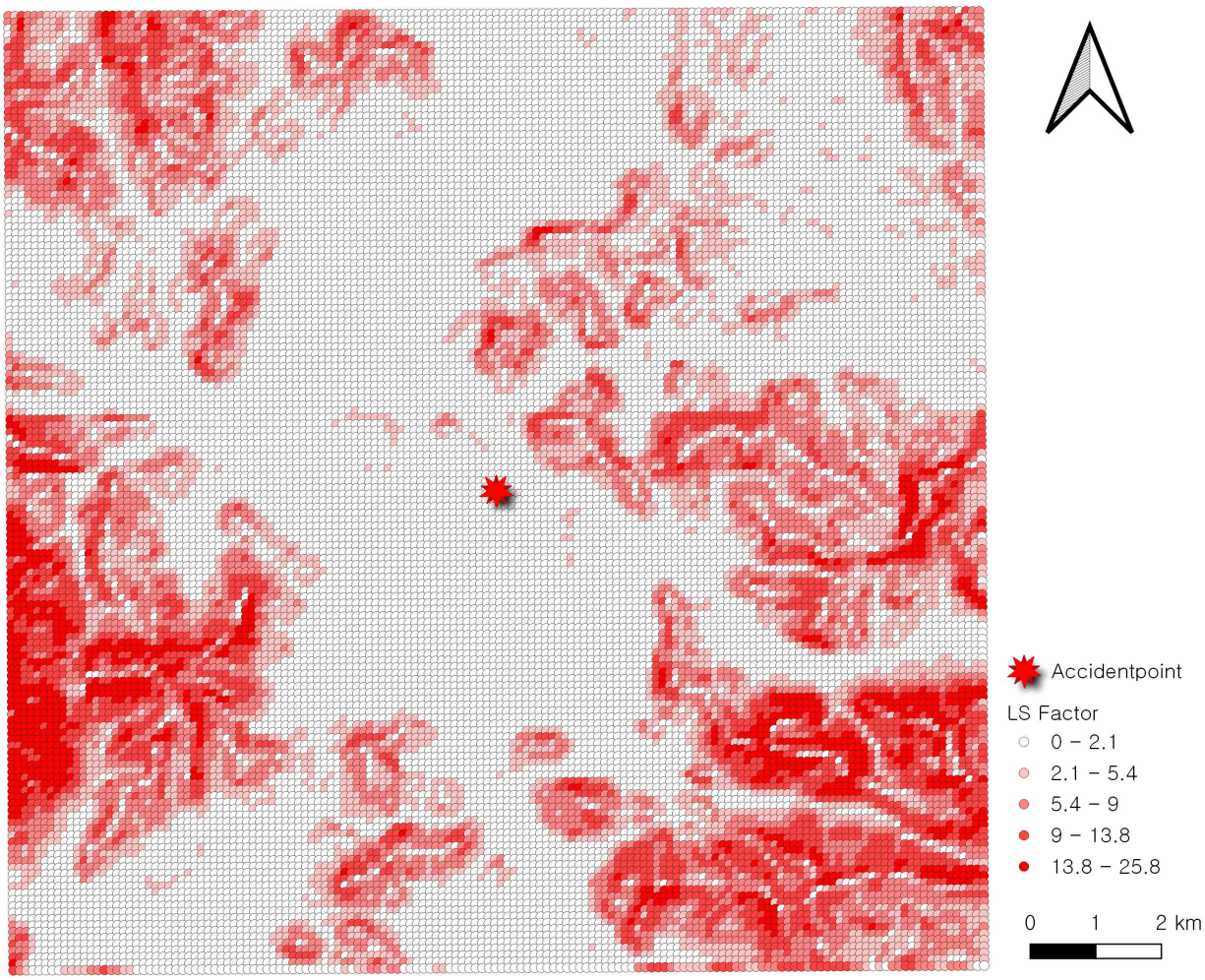
피복관리 인자는 작물, 성장단계, 곡물 수확, 관리방안 등에 의해 좌우된다. 본 연구에서는 정밀토양도의 토지 피복 지도를 활용하여 토지 피복 상태를 구축하였고, 환경부에서 제시한 '표토의 침식 현황 조사에 관한 고시'의 토지이용 및 식생 피복에 따른 식생 피복인자 값(C)을 활용하였다 (환경부, 2012). 격자별로 계산된 C 값을 QGIS를 통하여 격자 내 데이터로 구축하였다. <그림 9>는 모형에 구축된 K 값을 나타낸다.



<그림 9> 토양 피복관리 인자(C)값 산출

(4) 지형 인자(LS factor) 산출

지형 인자 LS는 DEM 자료를 연구지역에 맞게 수정한 뒤, 자료에 포함된 경사도와 Flow Accumulation을 이미지로 추출하여 QGIS의 SAGA GIS를 통하여 각 격자에 해당하는 LS 값을 계산하여 격자 내 데이터로 구축하였다. <그림 10>은 모형에 구축된 LS 값을 나타낸다.



<그림 10> 토양 지형 인자(C)값 산출

(5) 보전관리 인자(P)값 산출

보전관리 인자 P는 농경지에서 작물이나 영농방법이 토양유실량에 주는 영향 반영 인자로, <표 5>에 표시된 환경부에서 제시한 '표토의 침식 현황 조사에 관한 고시'를 따라 토지이용상태와 경사도를 고려한 값을 격자별로 계산하여 격자 내 데이터로 구축하였다.

<표 5> 토지 이용 및 경사도에 따른 보전관리인자(환경부, 2012)

토지 이용	경사도	보전관리인자 값(P)
나지		1.00
논	경사도< 2%	0.12
	경사도 2 ~ 7%	0.10
	경사도 7 ~ 15%	0.12
	경사도 15 ~ 30%	0.16
	경사도 > 30%	0.18
밭	경사도 < 2%	0.60
	경사도 2 ~ 7%	0.50
	경사도 7 ~ 15%	0.60
	경사도 15 ~ 30%	0.90
	경사도 > 30%	1.00
초지		1.00
산림		1.00
과수원		1.00

2) 지표유출량 산출

(1) 지표유출량, Q

지표유출량을 구하기 위해서 curve number 방법을 사용하였다 (Cronshey, 1986). 강우 최대 흡수량과 초기손실량은 유출곡선번호(Curve number, CN)에 의해 산정되며, CN은 수문학적토양군(Hydrologic soil group)과 선행함수조건(Antecedent moisture conditions, AMC)을 고려한다 (윤태훈, 2011). 선행함수조건은 1년을 강우량에 따라 성수기와 비성수기로 구분하고 5일 선행강수량을 기준으로 선행함수조건을 결정한다. 하지만, 본 연구에서는 단일 호우에 대한 영향을 평가하기 때문에 선행강수량을 기준 삼을 수 없다. 따라서, 본 연구의 계절적 배경인 여름에 연 강수량의 56%가 집중된다는 점을 고려하여 토양의 수분과 유출률이 보통인 상태인 AMC-Ⅱ로 가정하고, 환경부에서 제시한 홍수량 산정 표준지침에 따라 토지피복상태를 고려한 CN값을 산정하였다(환경부, 2019). 산정된 CN값은 각 격자 내 데이터로 구축하였다.

제 5 장. 모형의 신뢰성 평가

제 1 절 신뢰성 평가 방법

모형에 대한 최종 검증은 흔히 측정값과의 직접적 비교를 통해 이루어진다. 하지만 본 연구에서 개발된 모형의 경우, 실측치와의 비교를 통한 모형의 검증이 어려우며 그 이유는 다음과 같다. ① 화학사고 실측자료의 부재로 인해 비교가 어렵다. ② 또한, 본 연구에서 개발된 모형은 수체·저토를 포함한 다매체 환경에서의 화학사고 영향을 평가하기 때문에 대기만 평가하는 타 화학사고모형(PHAST, CARIS, AERMOD 등)의 예측과 직접 비교하기에는 적합하지 않다. ③ 대부분의 기존 다매체 모형은 장기적인 예측 또는 물질의 위해도 평가를 목적으로 만들어져(Jung et al., 2014; Kim et al., 2018; 장리아, 2019), 화학사고의 영향평가라는 목적으로 만들어진 물과 저토를 포함한 CAM과의 비교에 적합하지 않다.

하지만 본 연구에서 개발된 CAM은 기존에 개발된 대기와 토양에 대해 평가하는 화학사고 모형에 수체·저토를 평가할 수 있는 모듈을 개발하여 연결한 모형이다. 기존의 모형에 대한 신뢰성 평가는 이루어졌기 때문에(남은정, 2020), 본 연구에서는 대기와 토양을 제외한 수체·저토 모듈에 대해서 수체·저토의 오염도를 예측하는 기존의 수질모형과 비교하여 모형의 신뢰성을 평가했다. 수체와 저토의 오염도를 평가할 수 있는 모형을 선정하는 기준은 다음과 같다. ① 비정상상태 모의 가능 여부, ② 유기오염물질의 동태 모의 가능 여부, ③ 수체와 저토 간의 flux 모의 가능 여부, ④ 신뢰성이 충분히 검증된 모형일 것, 총 4가지이다. 선정된 기준을 토대로 수질모형들을 검토한 결과, Water Quality Analysis Simulation Program(WASP)을 선정하였다.

United States Environmental Protection Agency(USEPA)에서 개발된 WASP는 1970년에 개발되어 50년 동안 다양하게 사용되며 보완된 모형이다. 국내에서는 주로 수질 예측을 위해 사용되었으나, 한국수자원공사(1996, 1999)가 오염물질의 하천 유입과 관련하여 하천에서 수질 사고 또는 수질 악화 시, 오염물질의 이동특성에 관한 예측을 위해 WASP를 사용하여 평가하였다. 본 신뢰도 평가를 위해서는 WASP 중에서 WASP8을 사용하였다. 이는 WASP8이 본 연구에서 개발된 CAM과 같은 비정상상태 모형이며, 수체·저토 모듈과 동일하게 1차원 구조를 가진 격자구조

의 하천 흐름을 모의하고, 유기오염물질의 수체 내 이동을 모의할 수 있으며, 저토에 대한 평가가 가능하여 수체와 저토 간 오염물질의 이동을 모의할 수 있기 때문이다 (Knightes et al., 2019; Wool et al., 2020; Cope et al., 2020). WASP8의 기본 농도 예측 식은 다음과 같다(Wool et al., 2020).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial (U_x A_x C)}{A_x \partial x} + \frac{\partial (E_x A_x \frac{\partial C}{\partial x})}{A_x \partial x} + S_L + S_b + S_K$$

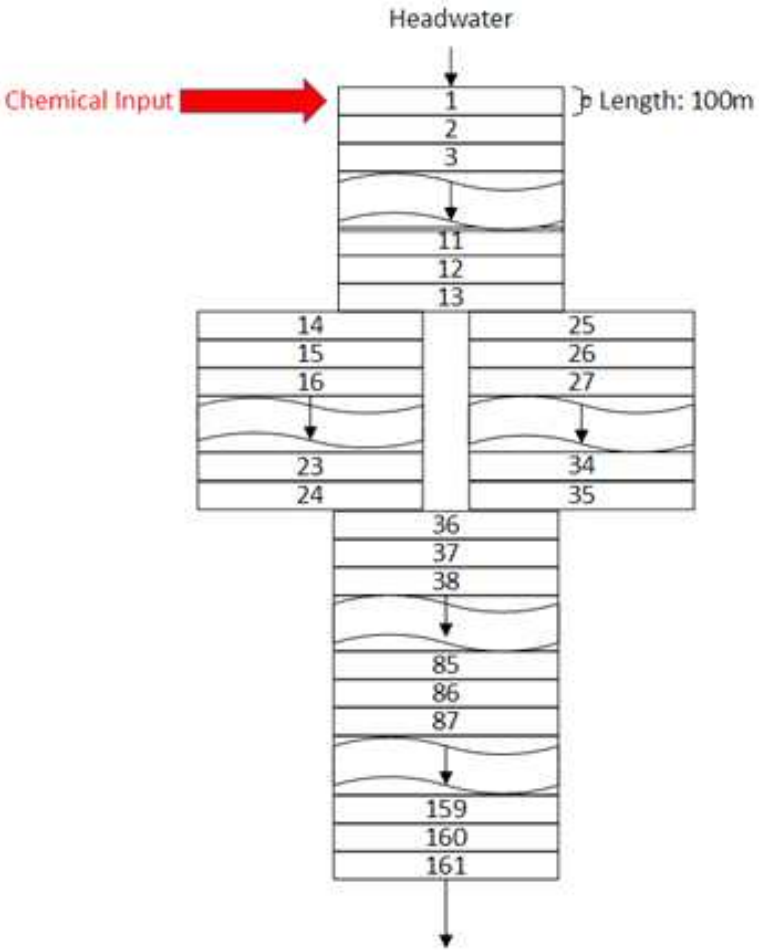
C: 수질항목 농도(mg/l)
t: 시간(day)
U_x : 종방향의 유속(m/day)
A_x : 통수단면적(m^2)
E_x : 종방향의 확산계수 (m^2/day)
S_L : 외부로부터 오염부하율$(g/m^3/day)$
S_B : 경계면으로부터 오염부하율$(mg/m^3/day)$
S_K : 수체 내부 동력학적 반응에 의한 총 변화율$(mg/m^3/day)$

CAM과 WASP8의 차이점은 다음과 같다. 먼저, WASP8은 유역모형이 아니기 때문에 대기와 토양을 통해 수체 오염이 발생하는 경우는 모의가 불가능하며, 수체로 직접 누출이 되는 경우만 모의 가능하다는 한계가 있다. 또한, 각 환경 매체가 하나의 격자에 동시에 존재하는 CAM과는 달리, WASP8은 수체와 저토를 각각 별개의 격자로 가정하며, 모형 내부에서 각 격자의 부피와 수심을 설정해야 한다는 차이점이 존재한다. 또한, CAM은 수체-저토 간의 흡·탈착을 반영하는 반면에, WASP8에서는 반영하지 않는다 (<표 6 참조>). 또한, CAM은 저토 매질-저토 내 입자상 간 오염물의 분배계수, 저토 매질-저토 내 용존상 간의 분배계수를 고려하여 저토에서의 물질 이동 기작을 모의한다. 하지만, WASP8에서는 토양-물 분배계수만을 반영하여 모의한다는 차이점이 있다.

<표 6> CAM과 WASP8의 반영 기작

Media	Process	CAM	WASP8
Water	1-dimensional advective flow	O	O
	Adsorption and desorption between water column and sediment	O	X
	Deposition to sediment	O	O
	Degradation in water	O	O
	Volatilization to air	O	O
Sediment	Resuspension to water	O	O
	Degradation in sediment	O	O
	Burial	O	O
Water - Sediment	Chemical transportation mechanism in sediment	O (including sediment matrix/ sediment particle partition coefficient & sediment matrix/ sediment-water partition coefficient)	O (only soil-water partition coefficient)

신뢰성 평가를 위해, WASP8에 입력된 기상조건, 배출조건 및 하천 깊이와 저토 깊이 등 기타 변수들은 CAM과 동일하게 설정하였다. 또한, WASP8은 격자 간의 횡 방향 이동은 고려하지 않기에 <그림 7>에 서술한 CAM의 격자 구조에서 같은 x축에 위치한 위치한 수체·저토 격자들을 <그림 11>에 표시된 것처럼 하나의 구간으로 가정하였다. 그 결과, CAM의 수체·저토 격자와 동일한 깊이를 가지는 161개의 수체 격자, 161개의 저토 격자를 WASP8에 구축하였다.



<그림 11> WASP8 구간 도식도

제 2 절 신뢰성 평가 결과

CAM과 WASP8의 결과를 시공간적으로 비교한 결과를 <표7>과 <그림 12>에 정리하여 나타냈다. 수체에서 두 모형의 평균 시공간적 예측값의 차이는 Ethylenediamine, MEK, Toluene, IDPI 순서로 1.22배, 1.30배, 1.33배, 1.23배이며, 저토에서는 112.42배, 10.41배, 2.66배, 1.16배로 저토에서 CAM이 Ethylendiamine, MEK, Toluene에 대해 WASP8보다 고평가한다.

CAM에서만 반영하는 수체-저토 흡·탈착 기작을 제외하고 모형을 구동하였을 때, 물에서 두 모형의 예측값의 차이는 Ethylenediamine, MEK, Toluene, IDPI 순서로 1.23배, 1.30배, 1.33배, 1.23배이며, 저토에서는 1.25배, 1.37배, 1.30배, 1.14배이다. 즉, 수체-저토 간 흡·탈착을 미반영 시, 두 모형의 예측값이 2배 이내로 나타났다. 따라서, Ethylenediamine, MEK, Toluene에서 저토에서 CAM과 WASP8의 예측값이 차이가 발생하는 이유는 수체-저토 간 흡·탈착에 기인함을 확인하였다.

CAM과 WASP8을 비교했을 때 모형의 과대예측, 과소예측과 같은 편향 정도를 평가하기 위한 통계적 성능지표로 Fractional Bias(FB)와 두 모형의 예측 경향성의 유사 정도를 평가하기 위해 Spearman 상관분석을 사용하였다(Hamby et al., 1994; Chang and Hanna, 2004). CAM에서 수체-저토 흡·탈착을 반영했을 때와 미반영했을 때의 각 물질의 수체와 저토에서의 각 시공간적 FB 값의 평균값과 상관분석 결과를 <표 8>에 정리하였다.

FB 값의 적정범위는 $-0.5<FB<0.5$이며, FB 값이 적정범위 내에 위치할 때, CAM의 예측값이 WASP8의 예측값과 일치한다고 판단할 수 있다(Chang and Hanna, 2004). 수체에서는 CAM의 수체-저토 흡·탈착 기작 반영 여부와 관계없이 FB 값이 적정범위 이내로 나타났다. 따라서, 수체에서 CAM이 WASP8보다 다소 고평가하지만, FB 기준으로 봤을 때 두 모형의 예측값의 차이가 크지 않다고 판단된다. 저토에서 CAM의 수체-저토 흡·탈착을 반영 시, FB 값은 Ethylenediamine, MEK, Toluene, IDPI 순서로 -1.95, -1.55, -0.71, -0.05으로 Ethylenediamine, MEK, Toluene의 FB 값이 적정범위 밖에 있다. 하지만, 수체-저토 흡·탈착을 미반영시, FB 값이 적정범위 이내로 나타나 두 모형의 예측값의 차이는 흡·탈착에 기인함을 다시 확인하였다.

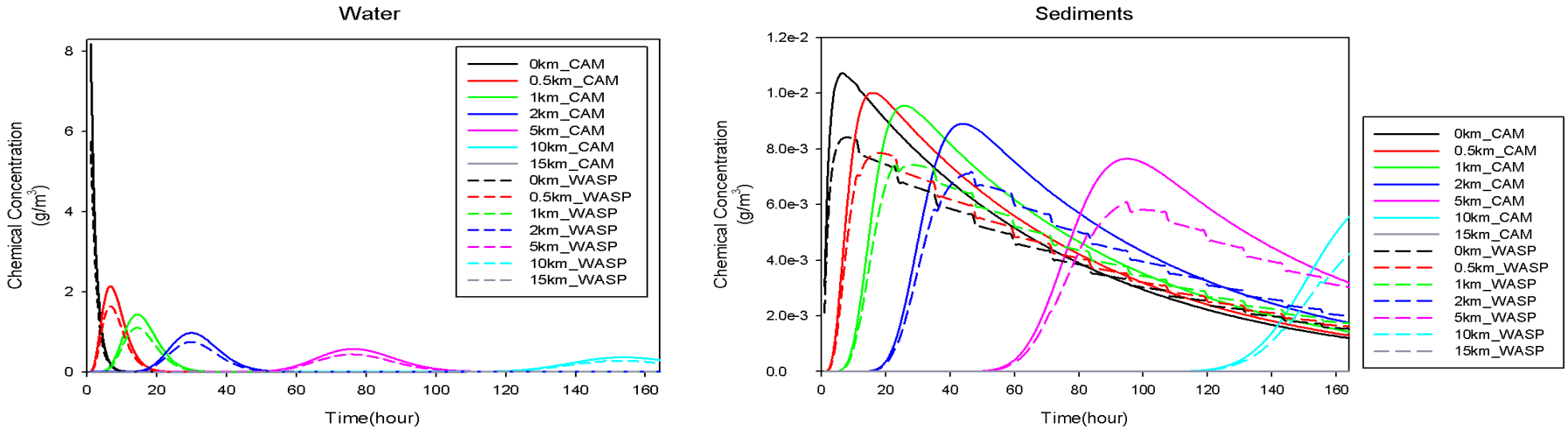
FB 값에서 CAM의 수체-저토 흡·탈착 반영 여부에 따라 차이가 발생하지만, 수체와 저토에서의 상관분석 결과, CAM의 수체-저토 흡·탈착 반영 여부와 관계없이

수체·저토에서 각각 강한 양의 상관관계가 있어 두 모형의 시공간적 예측 경향성이 매우 유사하다고 판단할 수 있다(Hamby et al., 1994).

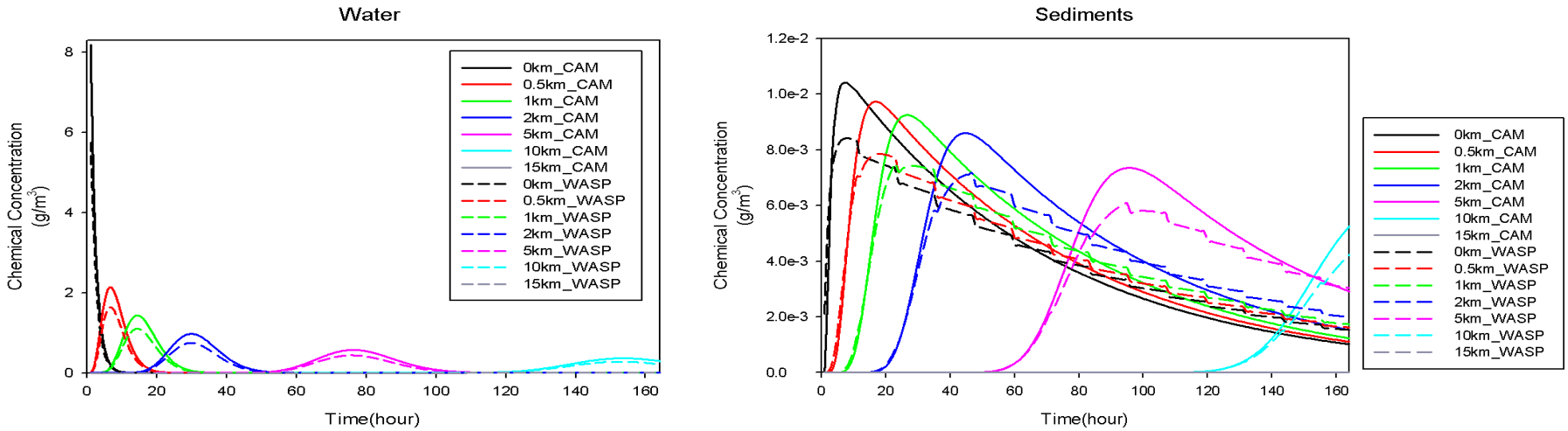
<표 7> CAM과 WASP8의 물질에 따른 시공간적 평균 예측 농도비

	환경 매체	Ethylenediamine	MEK	Toluene	IDPI
CAM에 수체-저토 간 흡·탈착 반영	수체	1.22	1.30	1.33	1.23
	저토	112.42	10.41	2.66	1.16
CAM에 수체-저토 간 흡·탈착 미반영	수체	1.23	1.30	1.33	1.23
	저토	1.25	1.37	1.30	1.14

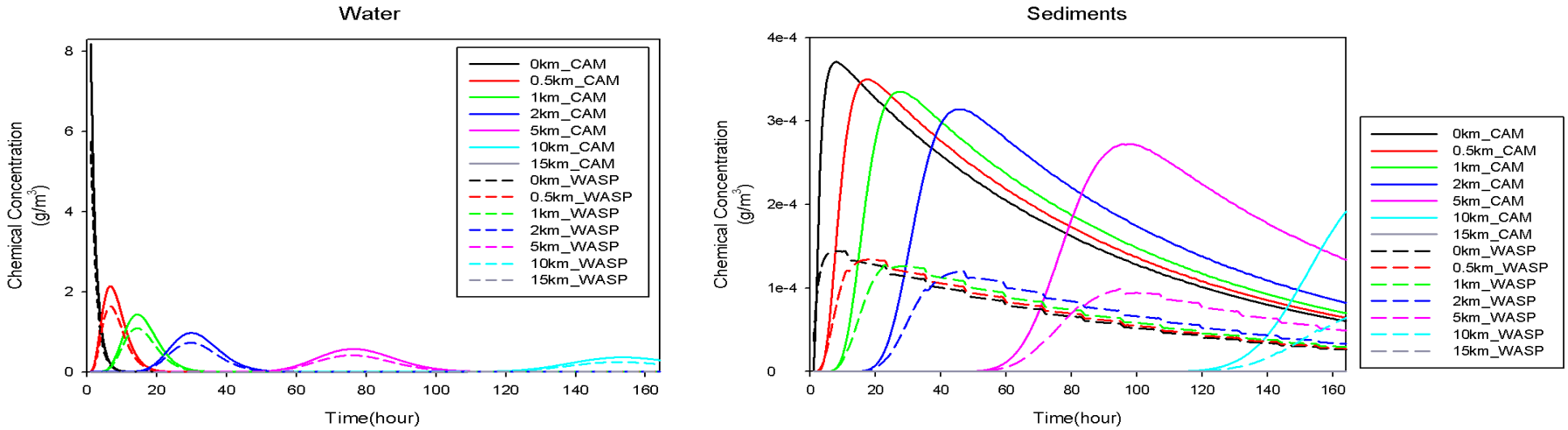
농도비 = [CAM/WASP8]



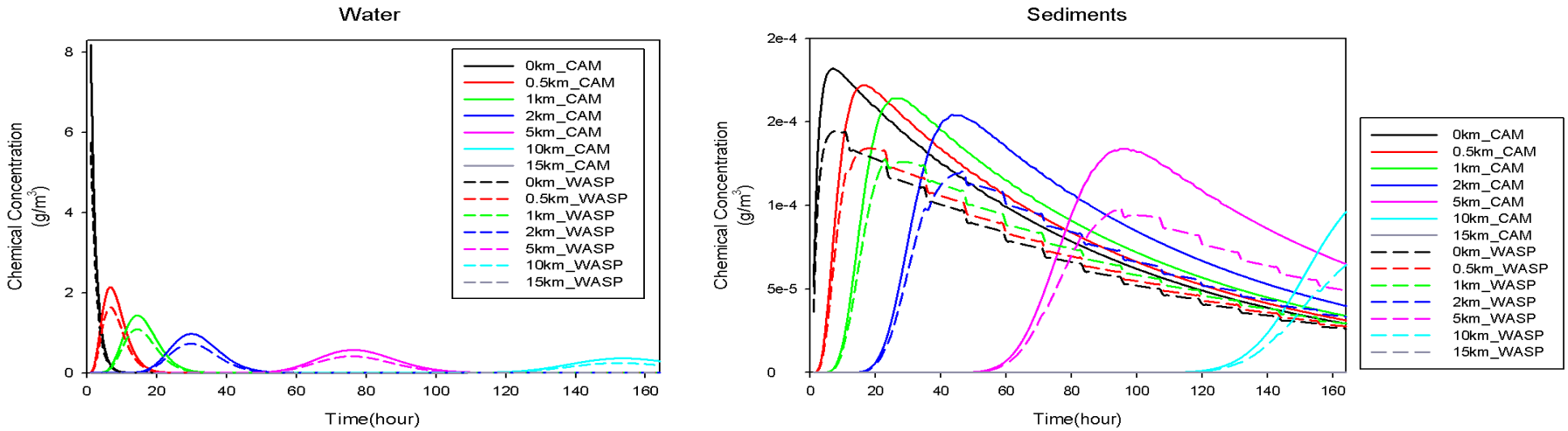
<그림 12-1> 수체-저토 간 흡·탈착 반영했을 때 IDPI의 매체 별 농도
(왼쪽: 수체, 오른쪽 : 저토)



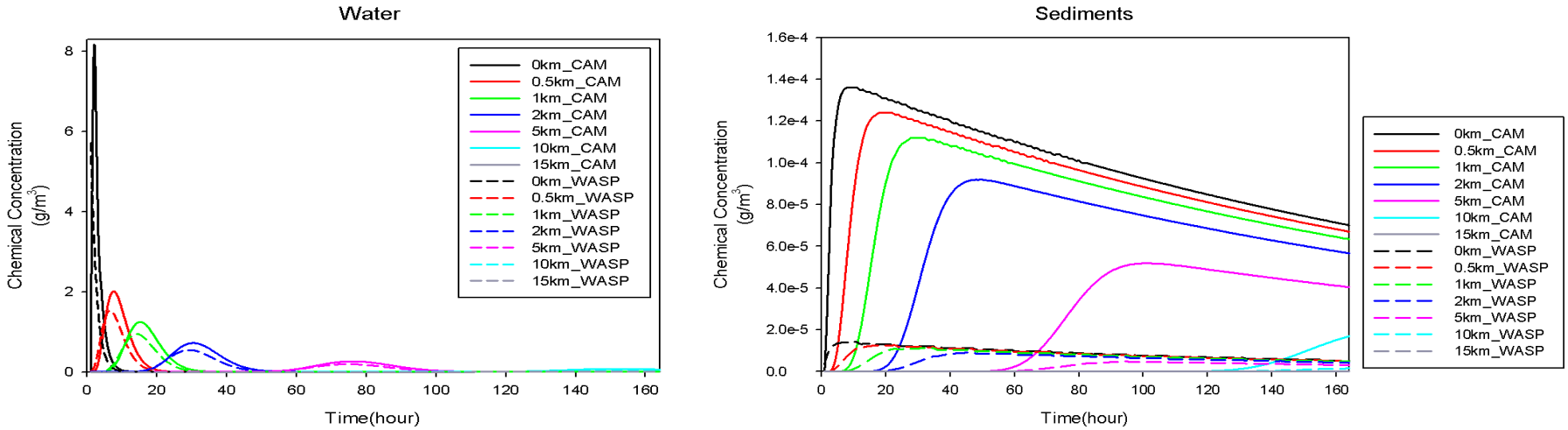
<그림 12-2> 수체-저토 간 흡·탈착 미반영했을 때 IDPI의 매체 별 농도
(왼쪽: 수체, 오른쪽 : 저토) (CAM: 화학사고 다매체 동태모형 WASP: WASP8)



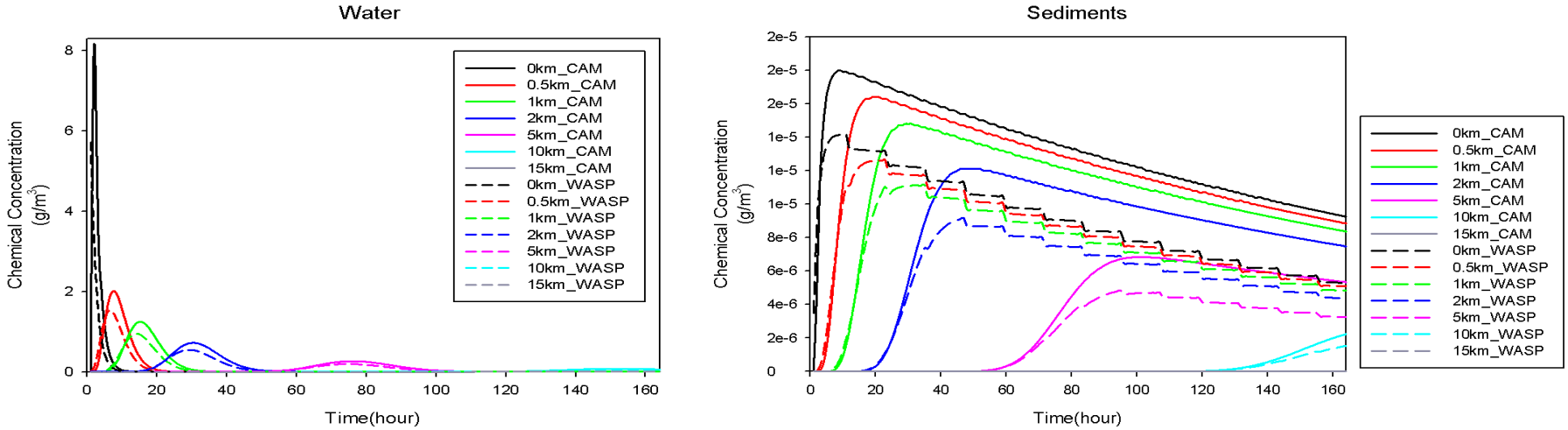
<그림 12-3> 수체-저토 간 흡·탈착 반영했을 때 Toluene의 매체 별 농도
(왼쪽: 수체, 오른쪽 : 저토) (CAM: 화학사고 다매체 동태모형 WASP: WASP8)



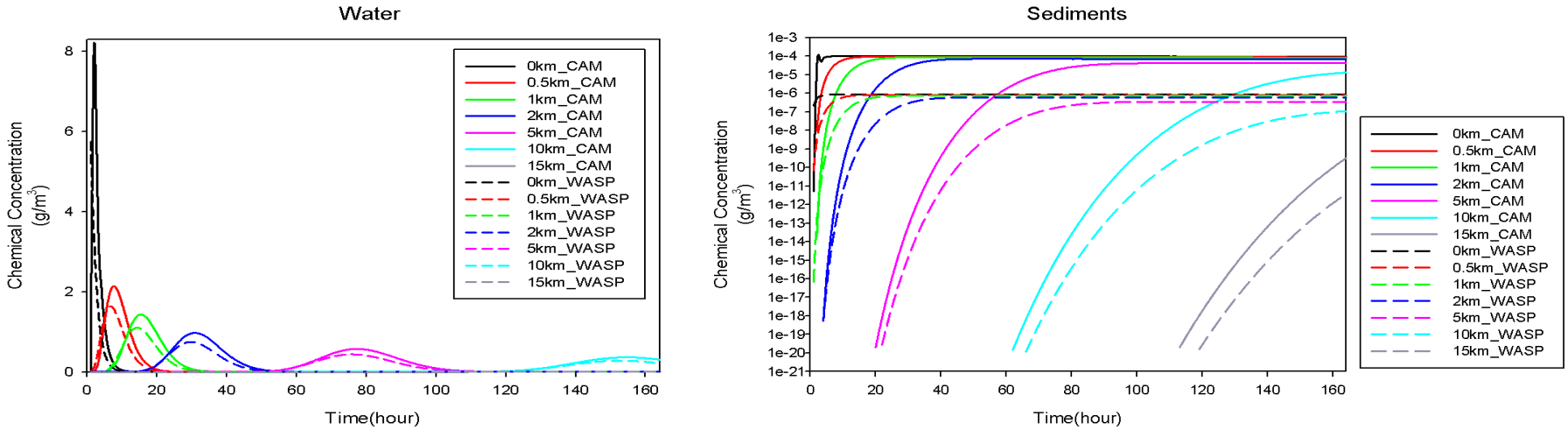
<그림 12-4> 수체-저토 간 흡·탈착 미반영했을 때 Toluene의 매체 별 농도
(왼쪽: 수체, 오른쪽 : 저토) (CAM: 화학사고 다매체 동태모형 WASP: WASP8)



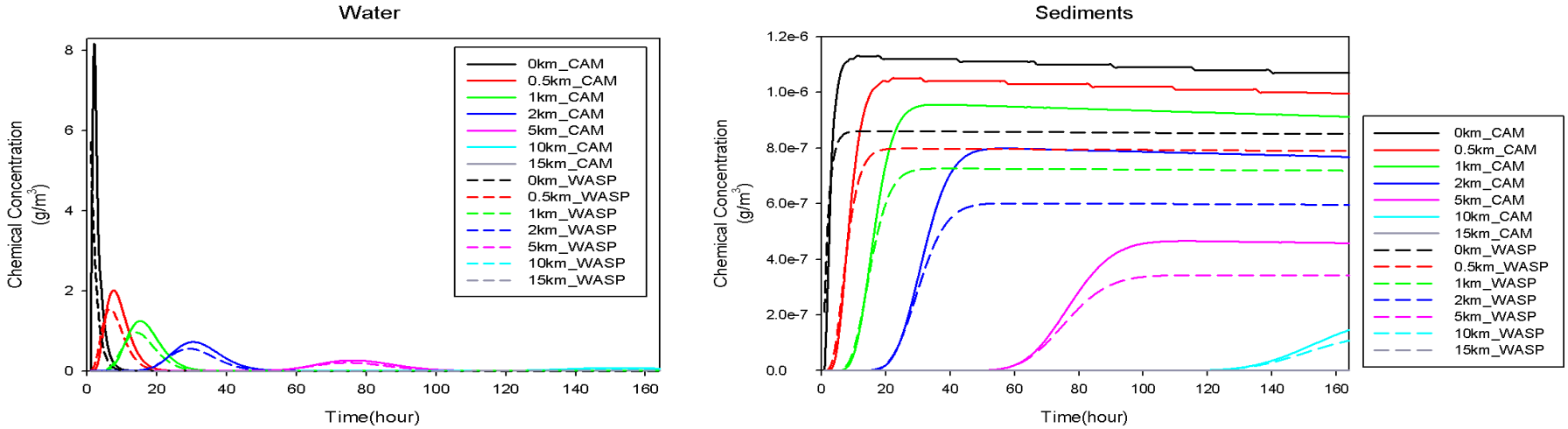
<그림 12-5> 수체-저토 간 흡·탈착 반영했을 때 MEK의 매체 별 농도
(왼쪽: 수체, 오른쪽 : 저토) (CAM: 화학사고 다매체 동태모형 WASP: WASP8)



<그림 12-6> 수체-저토 간 흡·탈착 미반영했을 때 MEK의 매체 별 농도
(왼쪽: 수체, 오른쪽 : 저토) (CAM: 화학사고 다매체 동태모형 WASP: WASP8)



<그림 12-7> 수체-저토 간 흡·탈착 반영했을 때 Ethylenediamine의 매체 별 농도
(왼쪽: 수체, 오른쪽 : 저토) (CAM: 화학사고 다매체 동태모형 WASP: WASP8)



<그림 12-8> 수체-저토 간 흡·탈착 미반영했을 때 Ethylenediamine의 매체 별 농도
(왼쪽: 수체, 오른쪽 : 저토) (CAM: 화학사고 다매체 동태모형 WASP: WASP8)

<표 8> CAM의 물질에 따른 모형 예측 성능지표

			Ethylenediamine	MEK	Toluene	IDPI
FB	CAM에 수체-저토 간 흡·탈착 반영	수체	-0.37	-0.36	-0.33	-0.20
		저토	-1.95	-1.55	-0.71	-0.05
	CAM에 수체-저토 간 흡·탈착 미반영	수체	-0.35	-0.34	-0.25	-0.19
		저토	-0.06	-0.05	-0.05	-0.03
Rho	CAM에 수체-저토 간 흡·탈착 반영	수체	0.999 (p<2.2 E-16)	0.999 (p<2.2 E-16)	0.999 (p<2.2 E-16)	0.999 (p<2.2 E-16)
		저토	1.000 (p<2.2 E-16)	1.000 (p<2.2 E-16)	1.000 (p<2.2 E-16)	1.000 (p<2.2 E-16)
	CAM에 수체-저토 간 흡·탈착 미반영	수체	0.999 (p<2.2 E-16)	0.999 (p<2.2 E-16)	0.999 (p<2.2 E-16)	0.999 (p<2.2 E-16)
		저토	1.000 (p<2.2 E-16)	1.000 (p<2.2 E-16)	1.000 (p<2.2 E-16)	1.000 (p<2.2 E-16)

CAM에서는 수체 저토 간의 흡·탈착을 two-film theory를 통해 모의하며, 저토 내 공극수의 오염물질과 저토 내 입자상에 흡착된 오염물질의 평형을 가정한다 (NERI, 2001; Thibodeaux, 2005). 따라서, <표 3-2>의 수체 모듈에 반영된 물질 이동 기작 중, 수체-저토 간 흡·탈착을 모의하는 물질 전달계수인 k_{Owsed}를 산정하는 데 있어, sediment matrix/sediment-water partition coefficient는 저토 내 입자상의 퓨가시티 용량과 저토 내 공극수의 퓨가시티 용량의 비로 나타낸다.

$$\frac{1}{k_{Owsed}} = \frac{1}{k_{wwsed}} + \frac{1}{k_{sedwsed} \cdot K_{sdmsdw}} \qquad \text{<식 8>}$$

k_{Owsed} : overall mass transfer coefficient between water and sediment

K_{sdmsdw} : sediment matrix/sediment-water partition coefficient

$k_{wwsed}, k_{sedwsed}$: water and sediment side individual mass transfer coefficients

$$K_{sdmsdw} = \frac{C_{sdm}}{C_{sdw}} = (1 - \theta_{SdW}) \cdot \frac{Z_{sdp}}{Z_{sdw}} + \theta_{SdW} \qquad \text{<식 9>}$$

θ_{SdW}: volume fraction of water in the sediment.

Z_{sdp}: fugacity capacity of the sediment particle

Z_{sdw}: fugacity capacity of the sediment pore water

$$Z_{sdp} = \frac{K_{oc} \cdot X_{oc} \cdot \rho_{sed}}{H} \qquad \text{<식 10>}$$

$$Z_{sdw} = \frac{1}{H}$$

K_{oc}: organic carbon-water partition coefficient(L/kg).

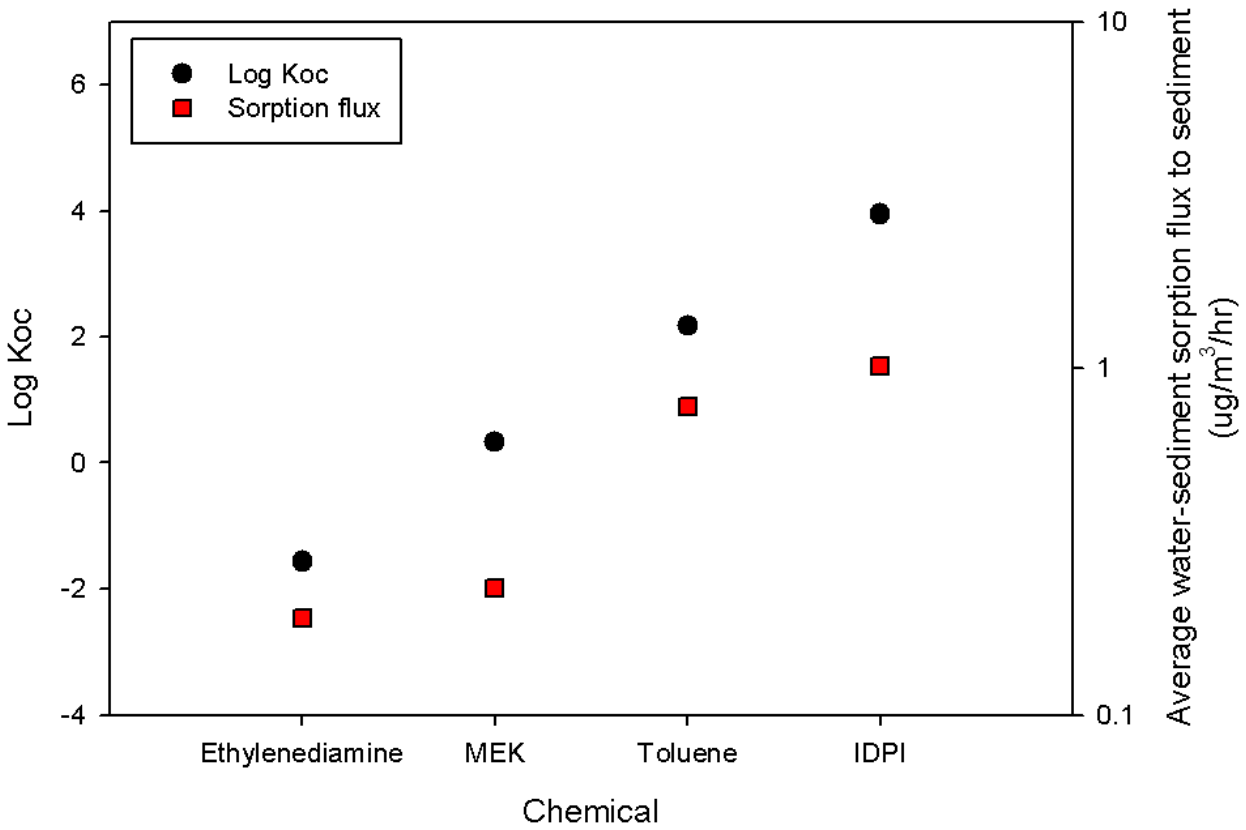
X_{oc}: mass fraction of organic carbon contained in the solid phase

ρ_{sp}: density of the solid particle (kg/L).

H: Henry's constant

이 때, 저토 입자상의 퓨가시티 용량은 K_{oc}가 증가할수록 증가한다. 일반적으로 K_{oc}는 K_{ow}가 증가함에 따라 증가하므로, <그림 13>에서 물질의 K_{ow}와 CAM에서 모의된 각 물질 별 수체-저토 흡·탈착에 의해 저토로 유입되는 flux를 비교하였다. 물질의 K_{ow}가 증가할수록 저토로 유입되는 수체-저토 간 흡·탈착 flux 또한 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 퓨가시티로 PCB의 수체-저토 간 분배를 평가한 결

과, 분자량과 K_{ow}가 클수록 저토로 더 분배된다는 연구 결과와 일치한다 (Wang et al., 2011).



<그림 13> K_{oc}와 CAM의 평균 수체-저토 흡·탈착 flux

하지만, 저토에서 CAM이 WASP8보다 2배 이상 고평가한 Ethylenediamine, MEK, Toluene의 K_{ow}의 값은 IDPI의 K_{ow}의 값보다 낮아 수체-저토 간 흡·탈착이 덜 발생했음에도 불구하고 저토에서 CAM이 WASP8보다 훨씬 더 고평가하는 것으로 나타났다. 이는 물질의 K_{ow}가 낮을수록, 수체-저토 간의 흡·탈착이 수체에서 저토로 이동하는 주 물질 이동 기작으로 작용했기 때문으로 판단된다. 아래 <표 9>에 CAM의 물질에 따른 침강 및 수체-저토 흡탈착에 의해 저토로 유입되는 평균 flux 예측값을 정리하였다.

<표 9> CAM의 물질에 따른 침강 및 수체-저토 흡·탈착에 의해 저토로 유입되는 평균 flux 예측값

	Ethylenediamine	MEK	Toluene	IDPI
침강 flux ($\mu g/m^3/hr$)	2.20E-03	3.57E-02	7.74E-01	4.40E+01
수체-저토 흡·탈착 flux ($\mu g/m^3/hr$)	1.90E-01	2.32E-01	7.74E-01	1.01E+00
흡·탈착 flux와 침강 flux의 비 (흡·탈착 flux/침강 flux)	8.64E+01	6.50E+00	1.00E+00	2.30E-02

<표 9>에서 Ethylenediamine, MEK, Toluene, IDPI의 수체-저토 간 흡·탈착 flux와 침강 flux의 비는 각각 86.4, 6.5, 1.00, 0.02로 예측되었다. 즉, 물질의 K_{ow}가 낮을수록, 수체-저토 간 흡·탈착이 오염물질의 주 이동 기작으로 작용하여 저토에서 CAM이 WASP8보다 고평가하였다.

본 연구에서는 실측값의 부재로 인해 신뢰성을 검증받은 모형인 WASP8과의 비교를 통해 CAM의 예측력을 평가했다. CAM과 WASP의 모든 물질에 대한 수체의 FB 값은 적정범위 이내로 두 모형의 예측값이 적절하게 일치한다고 판단할 수 있다 (Chang and Hanna, 2004). 또한, 상관분석 결과, 두 모형의 각 환경 매체와 물질에 대한 시공간적 예측값은 강한 양의 상관관계를 가지기에 CAM과 WASP8의 시공간적 예측 경향도 일치한다고 판단된다(Hamby et al., 1994; Chang and Hanna, 2004). K_{ow} 값이 낮은 물질에 대해서는 CAM이 WASP8보다 고평가하지만, 이는 WASP8에서는 미반영하는 수체-저토 간의 흡·탈착을 반영했기 때문이다. 따라서, 수체-저토 간의 흡·탈착은 수체에 유입된 오염물질이 매체 간 이동을 하는 주 기작 중의 하나이기에 이는 CAM의 WASP8보다 오염물질의 이동을 더 정교하게 모의한다는 장점으로 받아들일 수 있다(Mackay, 2001; Mackay and Thibodeaux, 2010).

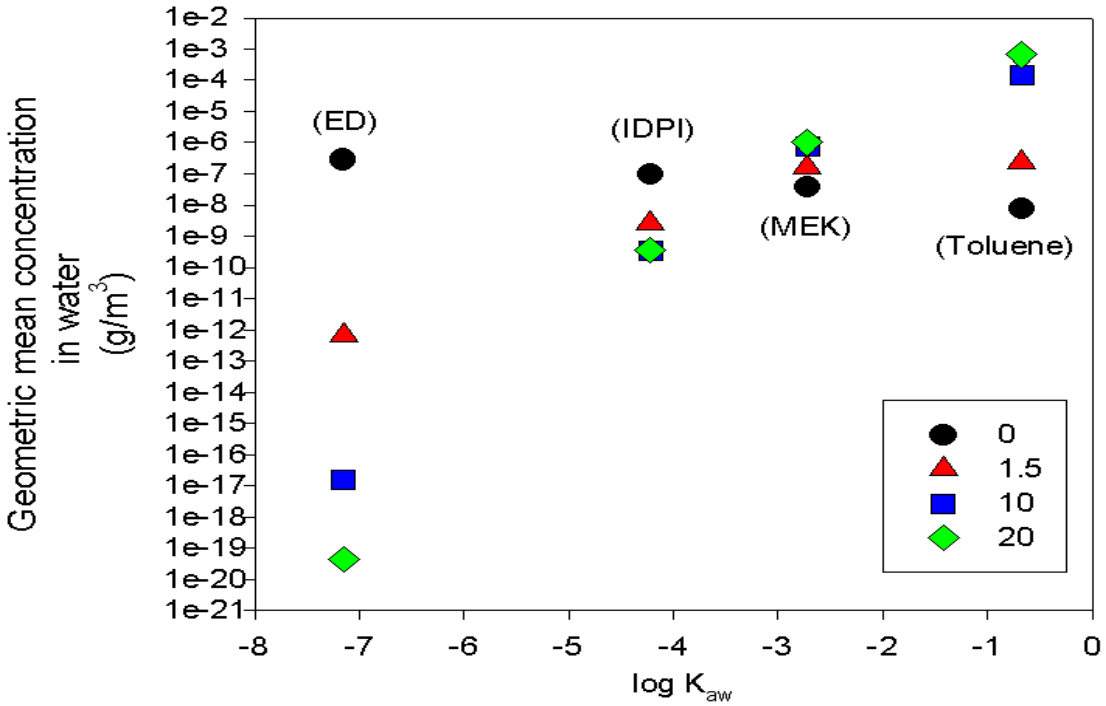
제 6 장. 연구 결과 및 고찰

제 1 절 물질과 시나리오에 따른 시공간적 변화 분석

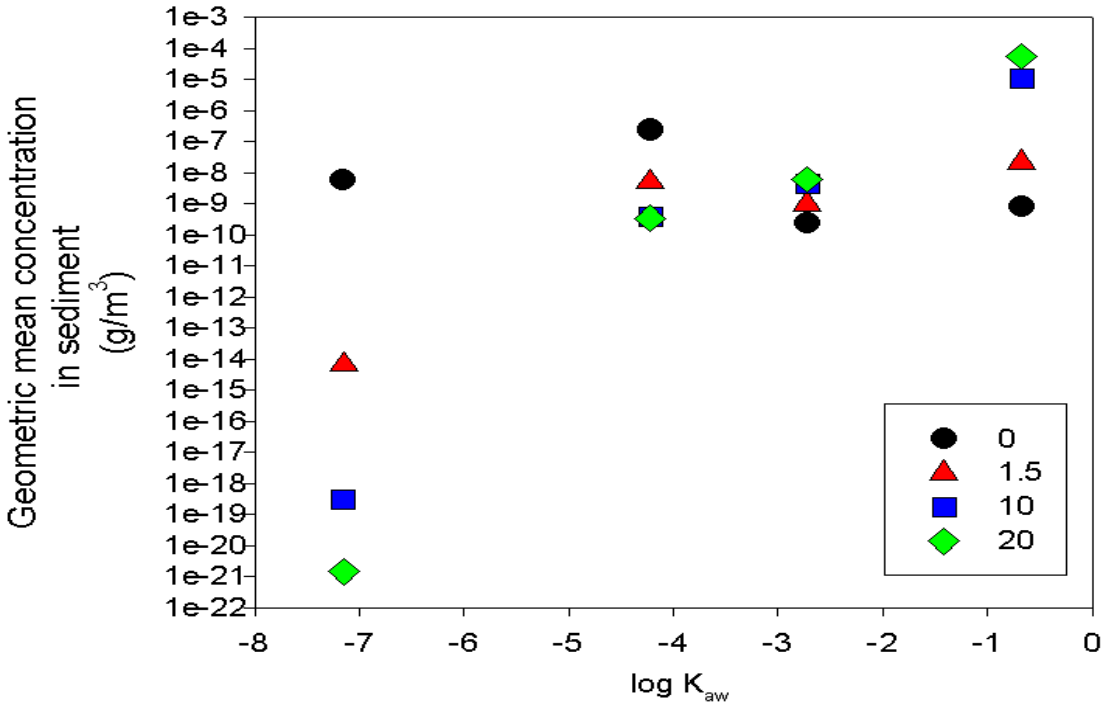
CAM을 이용해 강우 요인과 풍향이 화학사고가 수체와 저토에 미치는 영향에 끼치는 변화를 분석하기 위해, 다음과 같이 시공간적 오염도 변화를 분석하였다. 먼저 물질 i의 t 시간의 격자 x의 농도 값이 $C_i^{x,t}$일 때, 공간적 오염도 변화를 분석하기 위해 $C_i^{x,t}$의 각 C_i^{x}를 전체 시간에 대한 기하평균 값으로 계산하였다 (C_i^{x,gm_t}). 또한, 시간적 오염도 변화를 분석하기 위해, $C_i^{x,t}$의 전체 C_i^{x}를 매 시간에 대한 기하평균 값으로 계산하였다 ($C_i^{gm_x,t}$). 하지만 오염물질이 확산되는 초기(t=1~10)에는 매우 낮은 농도 값의(1e-30 g/m^3 이하) $C_i^{x,t}$에 의해 $C_i^{gm_x,t}$의 값이 불안정하여 시나리오 별 $C_i^{gm_x,t}$의 직접적인 비교가 불가능하다. 또한, $C_i^{x,t}$<1e-40 g/m^{3}일 경우, 모형에서 $C_i^{x,t}$=0이라고 가정함에 따라, 같은 t일 때, 시나리오 별로 C_i^{x}의 개수가 다르게 나타나 시나리오 별 $C_i^{gm_x,t}$의 직접적인 비교가 불가능하다. 따라서, 시나리오 별 시간적 오염도 변화를 분석하기 위해, 물질 i에 대해 모든 t와 시나리오에서 C_i^{x} 값을 가지는 격자들에 대한 기하평균 값으로 계산하였다 ($C_i^{gm_core_x,t}$). C_i^{x,gm_t}와 $C_i^{gm_core_x,t}$를 활용한 강우요인과 풍향에 따른 각 물질의 시나리오 별 시공간적 오염도 변화는 부록에 수록하였다.

1) 강우 강도에 따른 화학사고 영향

강우 강도에 따른 화학사고 영향을 분석하기 위해, <그림 14>에 강우 강도에 따른 수체·저토의 각 물질의 $C_i^{gm_core_x,t}$들의 기하평균으로 구한 대푯값과 각 물질의 octanol-air partition coefficient인 log K_{aw} 값을 나타냈다.



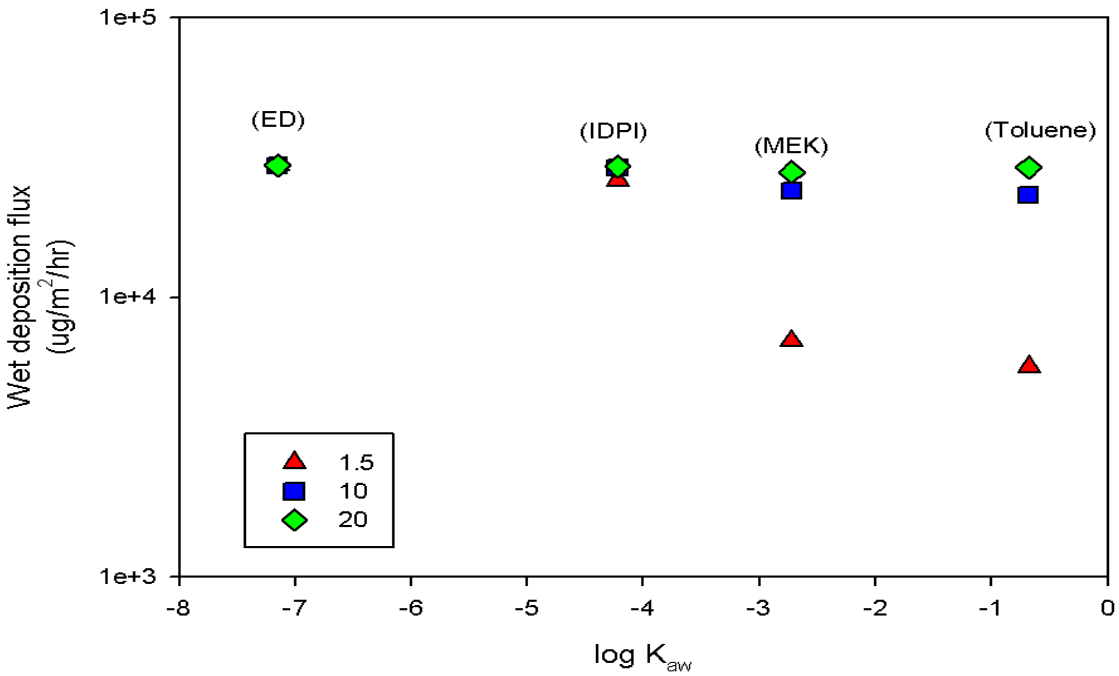
<그림 14-1> K_{aw}에 따른 강우 강도 별 수체에서의 오염도
(강우강도의 단위는 mm/hr)



<그림 14-2> K_{aw}에 따른 강우 강도 별 저토에서의 오염도

<그림 14>에서 강우가 없는 조건에서는 물질의 K_{aw}가 클수록 수체·저토의 오염도는 감소한다. 하지만, 강우 조건에서는 K_{aw}가 클수록 강우 강도와 수체·저토 오염도가 비례하며, K_{aw}가 작을수록 수체·저토 오염도가 반비례함을 알 수 있다. 또한, 강우가 없을 때와 20 mm/hr일 때를 비교하면 K_{aw}가 제일 큰 Toluene의 수체에서의 오염도는 K_{aw}가 제일 작은 ED보다 약 1.0E+16배로 물질의 물성과 강우 강도에 의해 수체·저토의 오염도가 크게 영향을 받음을 확인하였다. 또한, IDPI는 수체가 저토의 약 0.7배이며, ED는 수체가 저토의 약 56배 정도로 물질에 따라 수체와 저토의 오염도 비율이 다르게 나타남을 확인하였다.

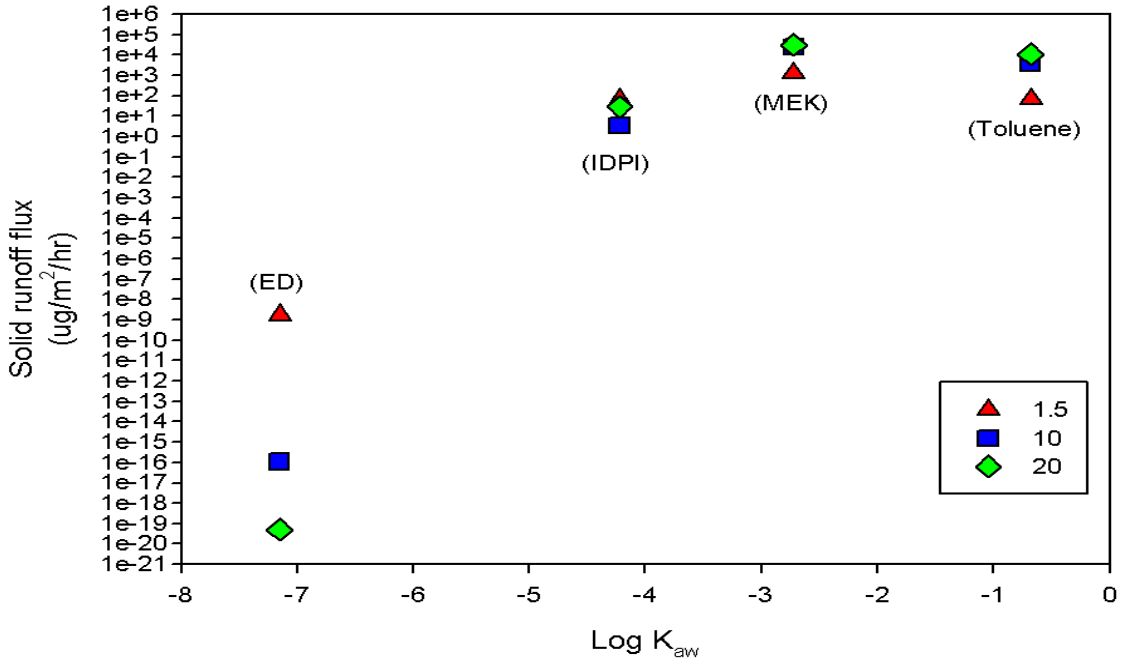
ED의 강우 강도에 따른 수체·저토 오염도의 감소는 IDPI보다 크며, Toluene의 강우 강도에 따른 수체·저토 오염도의 증가는 MEK보다 크다. IDPI와 MEK를 비교하면 강우 강도에 따른 수체·저토 오염도 변화가 감소에서 증가로 역전되는 것을 확인할 수 있다. 또한, IDPI는 강우 강도에 따라 수체·저토 오염도가 증가 또는 감소하는 물질들과 다르게 강우 강도에 따른 수체·저토 오염도가 감소했다가 증가하였다. 강우가 있을 때 발생하는 물질 이동기작은 습식침적과 Runoff이다. 따라서, 각 물성과 강우강도가 습식침적과 Runoff에 미치는 영향을 살펴보기 위해, <그림 15>에 강우 강도에 따른 각 물질 별 평균 침적 flux를 나타냈으며, <그림 16>에 강우 강도에 따른 각 물질 별 평균 Runoff flux를 나타냈다.



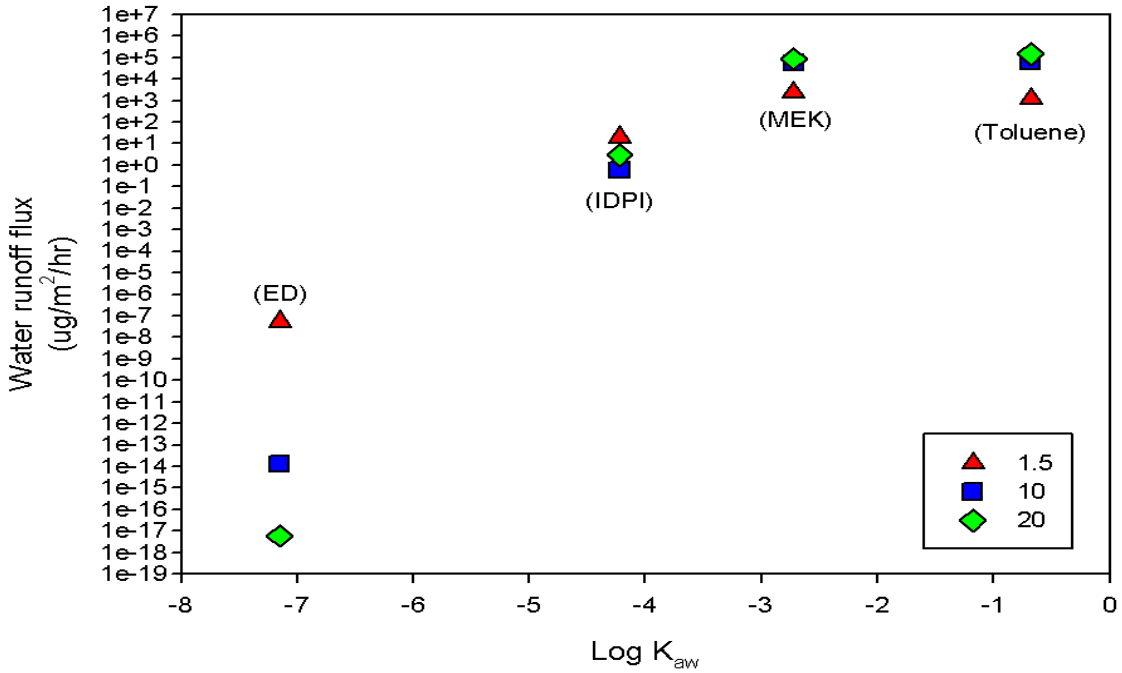
<그림 15> K_{aw}에 따른 각 물질의 강우 강도 별 습식침적 flux

먼저, <그림 15>에서 지표면으로 침적되는 습식침적 flux는 20 mm/hr에서 Toluene이 MEK보다 약 1.04배 더 크게 나타난 것을 제외하고 K_{aw}가 낮을수록 크게 나타났다. K_{aw}가 제일 작은 ED의 습식침적 flux는 강우강도가 1.5mm/hr일 때 K_{aw}가 제일 큰 Toluene의 약 4.64배이다. 하지만, 강우 강도 증가에 따른 습식침적 flux의 증가 정도는 K_{aw}가 클수록 높게 나타났으며, 강우 강도가 20mm/hr일 때, ED의 습식침적 flux는 Toluene의 약 1.02배이다.

강우 강도 20mm/hr에서 Toluene이 MEK보다 크게 나타난 이유는 다음과 같다. 습식침적은 입자상 물질의 세정과 가스상 물질의 세정으로 나뉘어진다. 강우가 증가함에 따라 입자상 물질의 세정과 가스상 물질의 세정이 증가하고, octanol-air partition coefficient인 K_{oa} (=K_{ow}/K_{aw})가 큰 물질일수록 입자상 물질의 세정이 증가하며, K_{aw}가 낮은 물질일수록 가스상 물질의 세정이 증가한다. 또한, 습식침적에 관한 여러 연구에서 입자상 물질의 세정 효율이 가스상 물질의 세정보다 더 큰 것으로 나타났다 (Ligocki et al., 1985a.b; Duinker & Bouchertall, 1989; Dickhut & Gustafson, 1995). 입자상 물질의 세정에 영향을 미치는 변수인 빗방울의 입경크기 분포는 강우 강도의 함수로 나타난다 (Marshall-Palmer, 1948; Pruppacher& Klett, 1980; Seinfeld & Pandis, 1988). MEK, Toluene, ED, IDPI 순서대로 log K_{oa}는 3.00, 3.24, 5.09, 8.97이며, MEK와 Toluene의 K_{aw}는 크지만 K_{oa}가 낮아, 입자상 물질의 세정이 적게 일어나고 가스상 물질의 세정이 적게 일어난다. 따라서 1.5mm/hr에서도 대기로 누출되어 대부분 지표면으로 침적되어 증가량이 적은 ED와 IDPI와 다르게, Toluene과 MEK는 강우 강도 증가에 따른 습식침적 flux의 증가량이 더 크게 관측된다. 또한, Toluene과 MEK의 K_{oa}의 차이보다 K_{aw}의 차이가 더 크기 때문에, 강우강도 10 mm/hr까지는 가스상 물질의 세정에 의해 MEK의 습식침적 flux가 더 크게 나타났지만, 20 mm/hr부터는 입자상 물질의 세정에 의해 Toluene의 습식침적 flux가 더 크게 나타났다고 판단된다.



<그림 16-1> K_{aw}에 따른 강우 강도 별 수체로 유입되는 Solid Runoff flux



<그림 16-2> K_{aw}에 따른 강우 강도 별 수체로 유입되는 Water Runoff flux

<그림 16>를 통해, Runoff flux는 K_{aw}가 클수록 flux가 증가한 습식침적과 반대

로 K_{aw}가 작을수록 Solid Runoff와 Water Runoff 둘 다 감소하는 경향이 관측됐다. 이는 Runoff는 습식침적 flux는 K_{aw}가 작을수록 토양으로 더 적게 침적되어 Runoff로 수체에 유입되는 양 또한 감소하기 때문이다. 또한, IDPI를 제외하고 ED, MEK, Toluene의 Solid Runoff flux는 같은 강우 강도의 Water Runoff flux보다 작다. 또한, ED는 강우강도에 따라 Runoff flux가 Solid와 Water 둘 다에서 감소하였고, MEK와 Toluene은 둘 다 증가한 반면에, IDPI는 Solid와 Water Runoff flux 둘 다 감소했다가 증가하였다. 마지막으로 ED의 경우, Solid Runoff flux와 Water Runoff flux 둘 다에서 강우 강도에 증가에 따른 Runoff flux 변화가 다른 물질들보다 더 크게 나타났다.

먼저, IDPI만 Solid Runoff flux가 Water Runoff flux보다 크게 나타난 이유는 다음과 같다. K_{ow}의 경우, 유기 분자의 소수성을 나타낼 수 있으며(Leo et al., 1971), 토양 내 유기 물질에 대한 흡착 정도를 예측한다 (Sabljic et al., 1995). 따라서, K_{ow}가 높을수록 오염물질이 소수성이며 토양 내 유기물질에 대한 흡착정도가 높아, Water runoff가 덜 발생한다. IDPI, Toluene, MEK, Ethylenediamine의 log K_{ow}는 4.75, 2.57, 0.28, -2.05이며 IDPI가 제일 큰 K_{ow} 값을 가지고 ED가 제일 작은 K_{ow} 값을 가진다. 실제 flux를 비교한 결과, IDPI는 Solid Runoff flux가 Water Runoff flux의 평균 약 6.26배, ED는 Solid Runoff flux가 Water Runoff flux의 평균 약 0.02배로 나타났다.

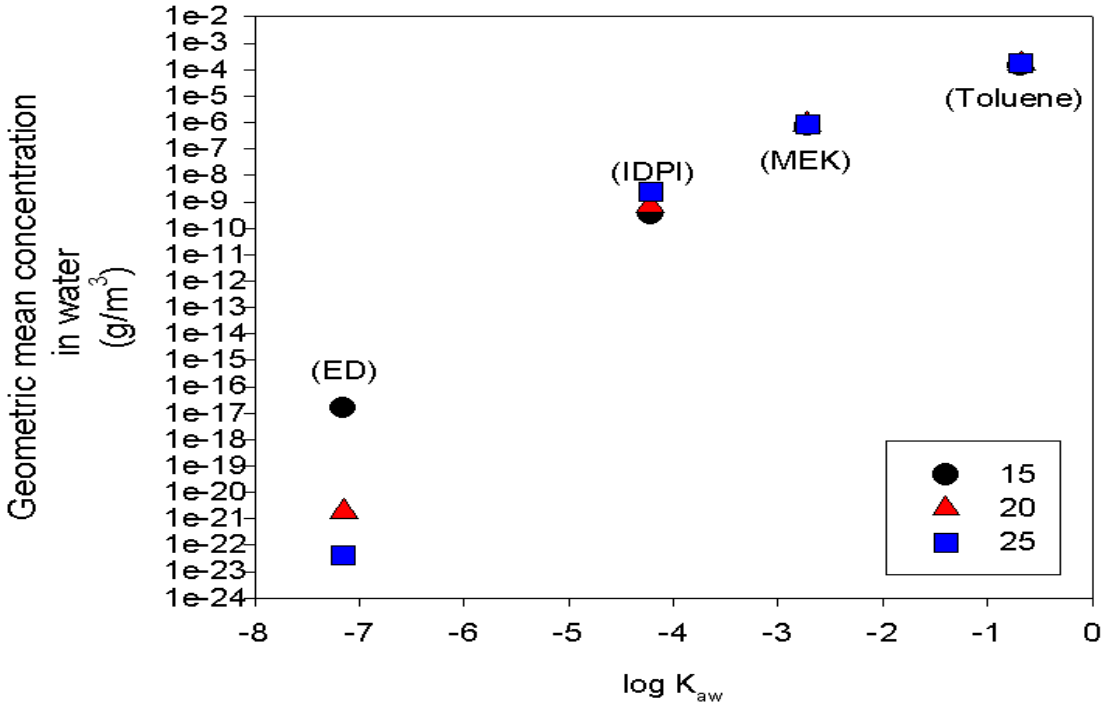
또한, IDPI의 Runoff flux 감소했다 증가한 이유는 다음과 같다. 앞서 습식침적 flux에서 설명했듯이 K_{oa}가 높을수록, K_{aw}가 낮을수록 습식침적 flux는 증가한다. IDPI의 높은 K_{oa}와 낮은 K_{aw}로 인해, 강우강도가 증가함에 따라 습식침적 flux가 증가하여 사고지점에서 거리가 멀어질수록 오염도가 강우강도와 반비례했다 (강우강도가 10mm/hr일 때 사고 지점 반경 50m의 토양 오염도는 1.5mm/hr의 평균 1.27배, 250m 반경에서 오염도는 1.5mm/hr의 평균 1.13배). 하지만 강우강도가 더 증가하면서 침식되어 유실되는 토사량 또한 증가함에 따라 Runoff flux 또한 증가하였다.

ED가 강우 강도 증가에 따른 Runoff flux 변화가 다른 물질보다 더 크게 나타난 이유는 토양에서 오염물질이 제거되는 기작 중 하나인 침출이다. ED는 다른 물질보다 낮은 K_{ow}를 가지며, 이는 토양 내 유기물질에 대한 흡착 정도가 낮음을 의미한다. 따라서, 강우에 의해 ED는 토양 내 침출 기작에 의해 다른 물질보다(K_{ow}가 제일 큰 IDPI의 평균 약 120배) 더 많이 제거됨에 따라 Runoff를 통해 수체로 유입되는 양이 더 큰 폭으로 감소했다.

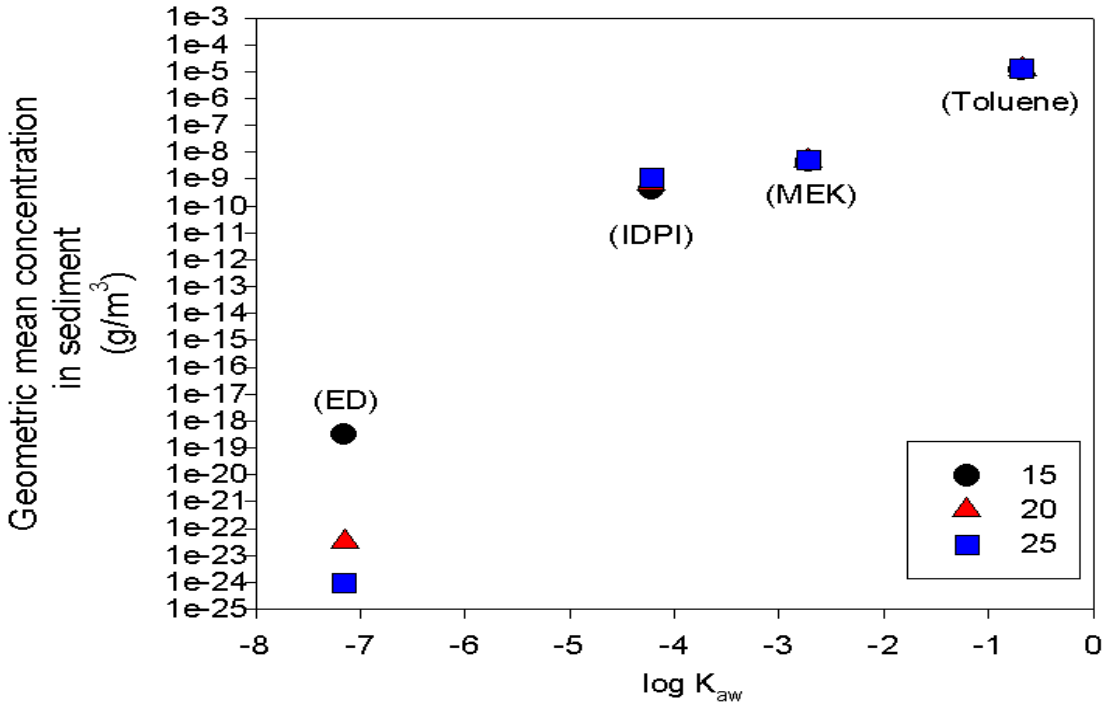
습식침적 flux와 Runoff flux를 중점으로 강우 강도가 증가함에 따라 K_{aw}가 낮을수록 수체·저토 오염도는 낮은 이유는 다음과 같다. 앞서 설명한 바와 같이, K_{aw}가 낮을수록 습식침적 flux가 증가하며, 대기에 있는 오염물질이 상대적으로 사고지점에서 거리가 떨어진 수체에 도달하기 전에 IDPI와 ED의 경우, Toluene과 MEK에 비해 많은 양이 습식침적에 의해 토양으로 침적됐기 때문이다. 상대적으로 IDPI와 ED보다 습식침적 flux가 낮은 Toluene과 MEK의 경우, 대기의 오염물질이 수체까지 도달하여 습식침적으로 수체로 침적되는 양이 강우 강도에 따라 증가한다. 또한, Runoff flux는 습식침적 flux에 영향을 받으며, K_{aw}가 낮을수록 토양으로 적게 침적되어 Runoff에 의해 수체로 유입되는 양이 감소한다. 또한, ED의 강우강도에 따른 오염도 변화가 다른 물질들보다 크게 나타난 이유는 낮은 K_{aw}로 인해 습식침적에 의해 토양으로 이동하는 양이 많고, 토양 내 침출기작에 의해 토양에서 제거되는 양이 다른 물질들보다 많기 때문이다. IDPI와 MEK가 강우강도가 증가함에 따라 오염도의 변화 방향이 바뀌는 이유는 큰 K_{oa} 값으로 인해 IDPI는 습식침적에 의해 수체로 유입되는 양이 줄어드는 반면에, MEK는 낮은 K_{oa} 값으로 습식침적에 의해 수체로 유입되는 양이 증가하기 때문이다. 마지막으로 각 물질마다 수체와 저토의 오염도 비율은 K_{ow}가 높을수록 저토의 오염도 비율이 높으며, 낮을수록 수체의 오염도 비율이 높다.

2) 강우 지속시간에 따른 화학사고 영향

강우 지속시간에 따른 화학사고 영향을 분석하기 위해, <그림 17>에 강우 지속시간에 따른 수체·저토의 각 물질의 $C_i^{gm_core_x,t}$들의 기하평균으로 구한 대푯값과 각 물질의 log K_{aw} 값을 나타냈다.

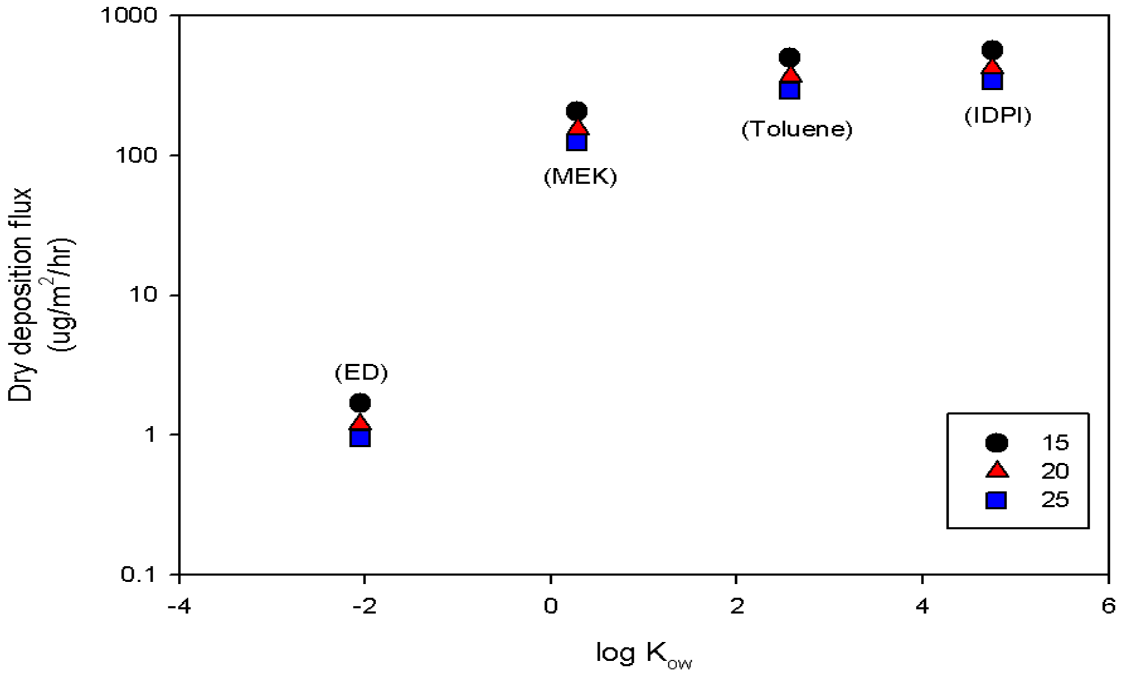


<그림 17-1> K_{aw}에 따른 수체에서의 각 시나리오 별 오염도

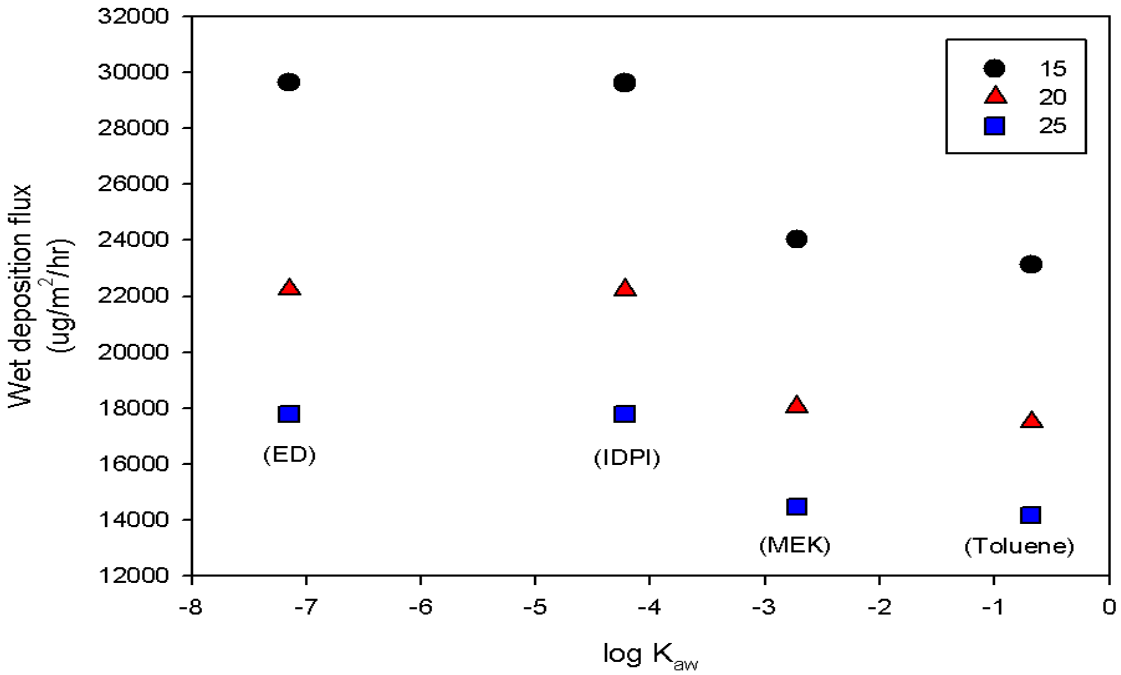


<그림 17-2> K_{aw}에 따른 저토에서의 각 시나리오 별 오염도

<그림 17>에서, K_{aw}가 작을수록 수체·저토 오염도는 작다. 특히 K_{aw} 값이 제일 작은 ED의 경우, 다른 물질들과 다르게 강우 지속시간이 증가함에 따라 오염도가 감소했으며, 변화폭 또한 크게 나타났다. ED보다 큰 K_{aw}를 값을 가지는 물질들의 경우, 강우지속시간이 증가함에 따라 오염도 또한 증가했으며, IDPI는 MEK와 Toluene보다 더 높은 증가율을 나타냈다. 또한 수체와 저토 간의 오염도의 비율은 앞서 강우 강도에서 설명한 바와 같은 이유로 강우 지속시간에 영향을 받는 물질 이동기작인 침적 flux의 물성에 따른 변화를 다음 <그림 18>에 나타내었다.



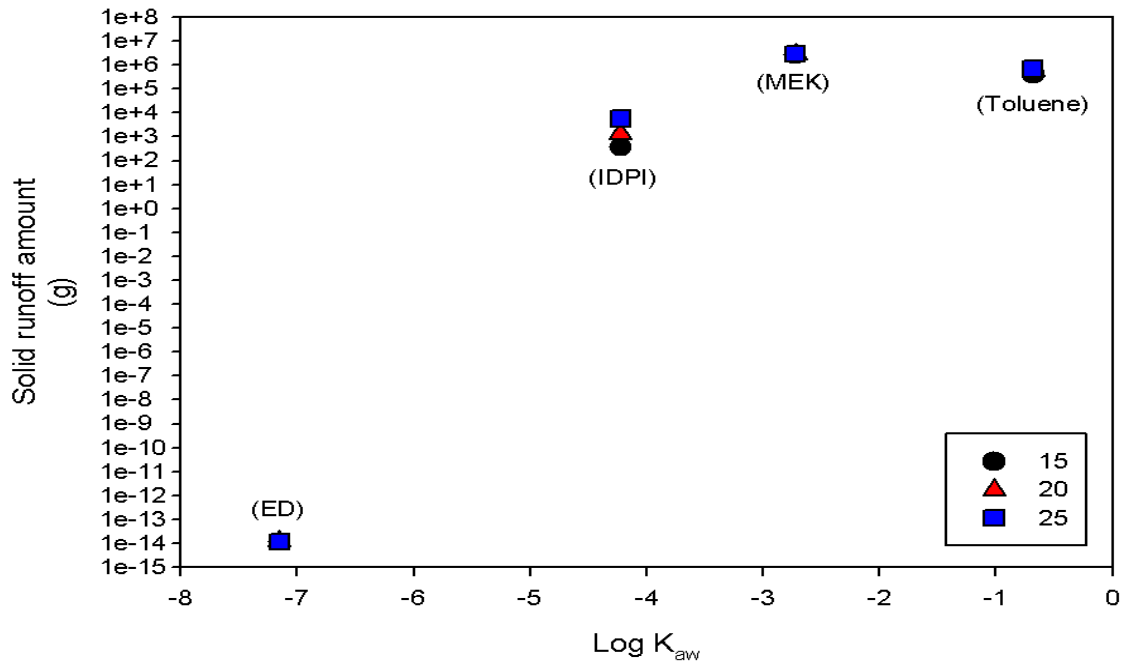
<그림 18-1> K_{ow}에 따른 각 물질의 강우 지속시간 별 건식침적 flux



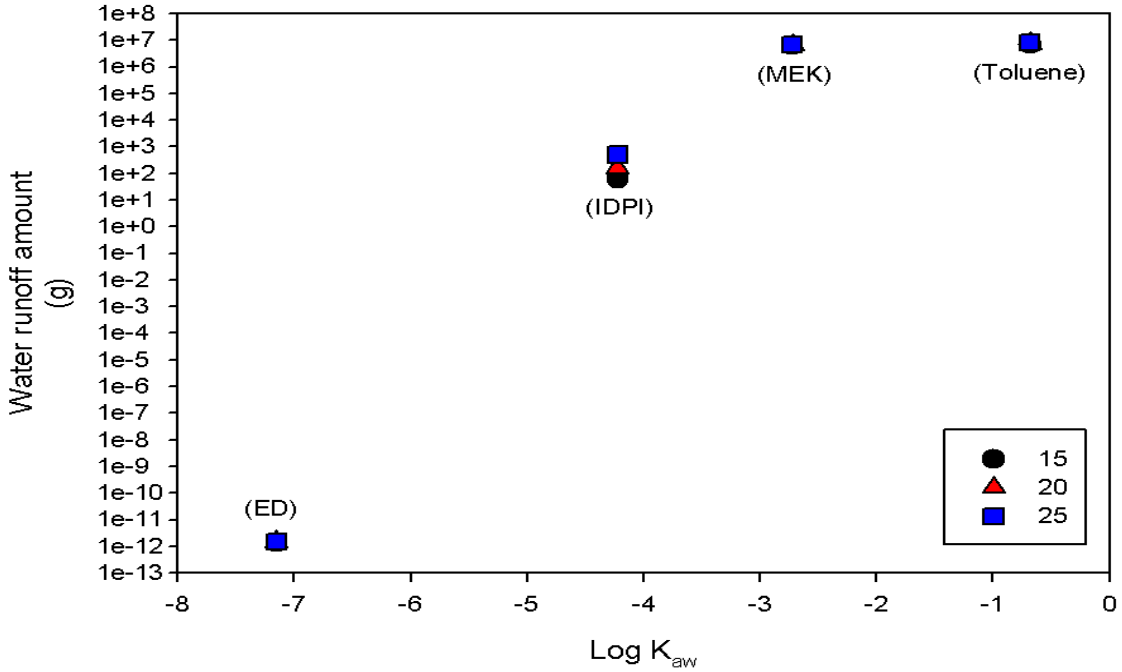
<그림 18-2> K_{aw}에 따른 각 물질의 강우 지속시간 별 습식침적 flux

<그림 18>에서, 건식침적 flux는 K_{ow}가 클수록 증가하는 경향을 보이며 습식침적 flux는 강우강도에서 설명한 바와 같이 K_{aw}가 낮을수록 증가하였으나, K_{aw}가 <-4인 ED와 IDPI에 대해서는 습식침적 flux가 동일하게 나타났다. 습식침적 flux와 건식침적 flux에서 모든 물질에 대해 강우 지속시간이 증가함에 따라 flux가 감소했으며, 물성 별로 변화폭의 뚜렷한 차이는 확인되지 않았다.

먼저, 건식침적 flux가 K_{ow}가 클수록 증가하는 경향을 보인 이유는 다음과 같다. 앞서 강우강도에서 설명한 바와 같이, K_{aw}가 낮을수록 습식침적은 증가한다. 습식침적의 증가는 건식침적으로 대기에서 제거되는 오염물질 양의 감소를 의미하며, K_{oa}가 클수록 입자상 물질의 세정은 커지므로 $K_{ow}(=K_{oa}/K_{aw})$가 클수록 건식침적되는 양이 증가하게 된다. 또한, 습식침적 flux는 감소했으나, 이는 오염물질의 제거량의 증가율보다 강우 지속시간의 증가율이 더 크기에 flux가 감소한 것이며, 건식침적 flux는 오염물질의 제거량 감소로 인해 flux가 감소한 것으로 확인됐다. 강우 지속시간에 따른 침적 flux 변화와 더불어, 강우 지속시간에 영향을 받는 물질 이동기작인 Runoff로 수체로 유입된 양의 물성에 따른 변화를 다음 <그림 19>에 나타내었다.



<그림 19-1> K_{aw}에 따른 강우 지속시간 별 Solid Runoff에 의해 수체로 유입된 양



<그림 19-2> K_{aw}에 따른 강우 지속시간 별 Water Runoff에 의해 수체로 유입된 양

<그림 19>을 통해, 강우 강도에서 설명한 바와 같이, Runoff로 수체에 유입되는 양은 K_{aw}와 비례하다는 것을 확인할 수 있다. 강우 지속시간이 증가함에 따라 모든 물성에서 Solid Runoff, Water Runoff는 증가했으나, IDPI가 가장 뚜렷하게 강우 지속시간에 의해 Runoff 되어 수체로 유입되는 양이 증가했다. 토양 내 유입된 오염물질은 침출에 의해 제거되며 침출되는 정도는 물질의 K_{ow}가 낮을수록 증가한다. 따라서 IDPI의 경우, 높은 K_{ow} 값으로 인해 침출로 제거되는 다른 물질에 비해 작아 (Kow가 제일 작은 ED의 평균 약 0.02배) 상대적으로 강우 지속시간이 증가함에 따라 Runoff되는 양의 증가도 더 커졌다. 또한 앞서 강우 강도에서 설명한 바와 같이, Kow가 클수록 Solid Runoff로 유입되는 양이 Water Runoff로 유입되는 양 보다 많다. K_{ow}가 가장 큰 IDPI의 경우, Solid Runoff에 의해 수체로 유입되는 양이 Water Runoff의 평균 약 8.5배이며, K_{ow} 가 가장 작은 ED의 경우, Solid Runoff에 의해 수체로 유입되는 양이 Water Runoff의 평균 약 0.008배이다.

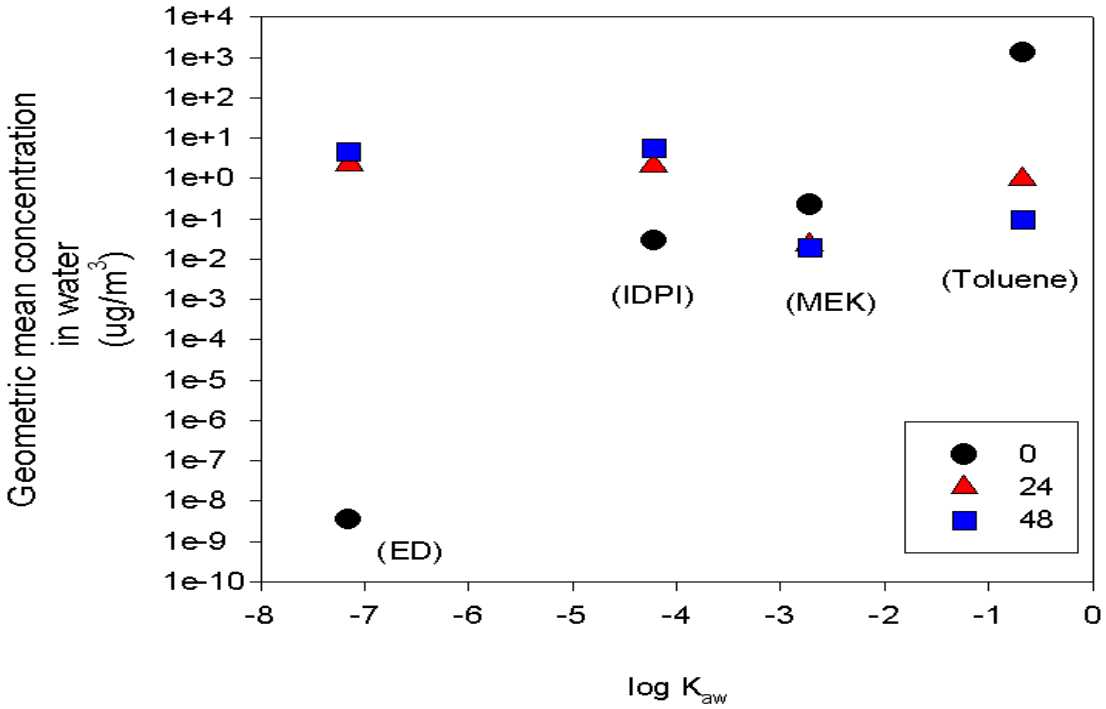
강우 지속시간의 증가에 따른 침적 flux와 Runoff에 의해 수체로 유입되는 양의 변화를 살펴본 결과, K_{ow}가 클수록 건식침적 flux는 증가했으며, K_{aw}가 작을수록 습식침적 flux는 증가한다. 또한, 강우 지속시간이 증가함에 따라 습식침적에 의해 제

거되는 오염물질의 양이 증가하여 건식침적 flux는 감소하였다. Runoff의 경우, K_{aw}가 작을수록 수체로 유입되는 양이 작으며, K_{ow}가 높을수록 침출에 영향을 덜 받아 Runoff에 의해 수체로 유입되는 양이 증가했다. 또한, 강우 지속시간이 증가함에 따라 Runoff에 의해 수체로 유입되는 양이 증가하였다.

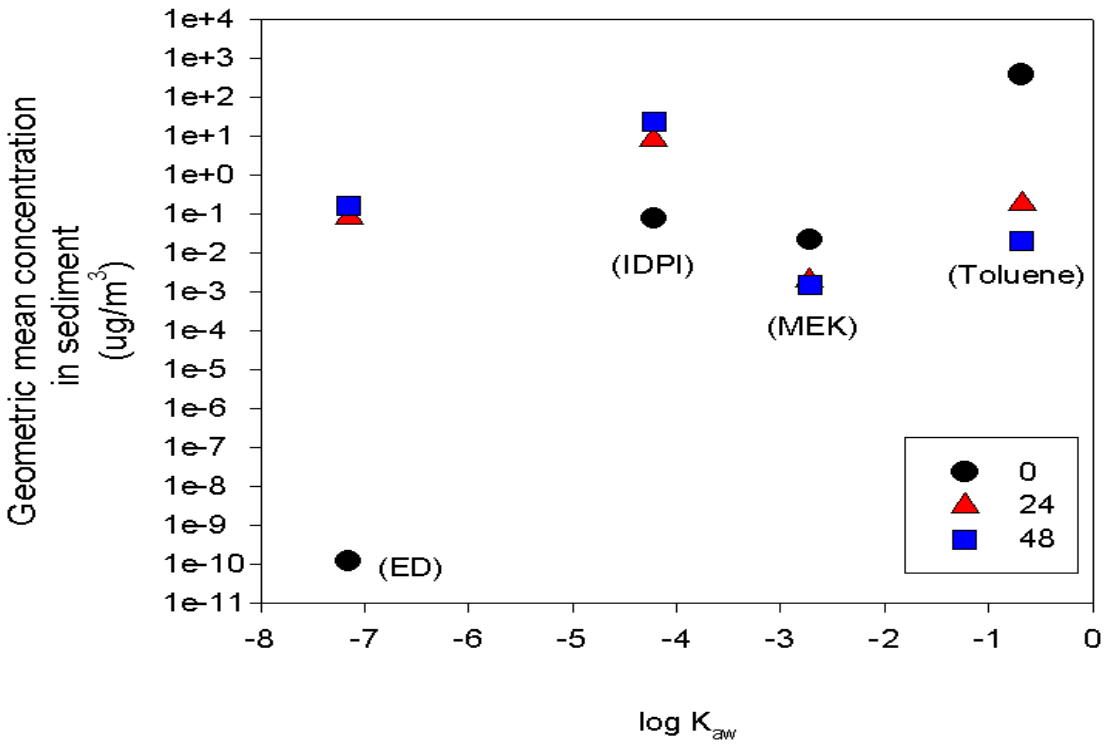
따라서, ED의 경우, K_{aw}와 K_{ow}값이 낮으며, 습식침적 flux가 다른 물질들보다 크기에 상대적으로 수체에 침적되는 양이 적으며, 대기에서 습식침적으로 제거되는 양이 강우 지속시간 증가에 의해 증가함에 따라 건식침적 flux가 감소하였다. 또한, 강우 지속시간이 증가함에 따라 침출에 의해 토양에서 제거되는 양이 증가하여 Runoff에 의해 수체로 유입되는 양도 감소한다. 그 결과, 다른 물질들과 다르게 강우 지속시간이 증가함에 따라 수체·저토 오염도가 감소했으며, 변화폭 또한 크게 나타났다. 또한, IDPI는 상대적으로 침출에 의한 영향을 덜 받아 강우 지속시간이 증가할수록 Runoff로 수체로 유입되는 양의 증가가 다른 물질에 비해 크다. 그로 인해 강우 지속시간이 증가할수록 다른 물질들보다 더 높은 수체·저토 오염도 증가율이 확인되었다.

3) 강우 시기에 따른 화학사고 영향

강우 시기에 따른 화학사고 영향을 분석하기 위해, <그림 20>에 강우 시기에 따른 수체·저토의 각 물질의 $C_i^{gm_core_x,t}$들의 기하평균으로 구한 대푯값과 각 물질의 log K_{aw} 값을 나타냈다.

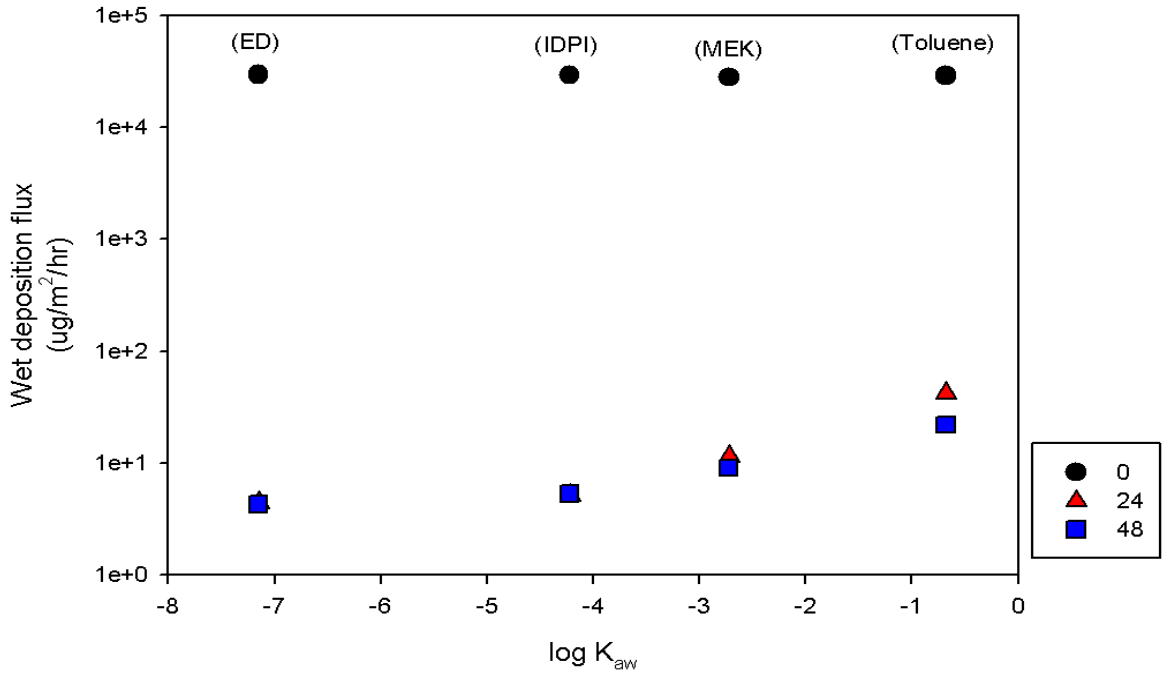


<그림 20-1> K_{aw}에 따른 수체에서의 각 강우 시기 별 오염도
(강우 시기의 단위는 hr)



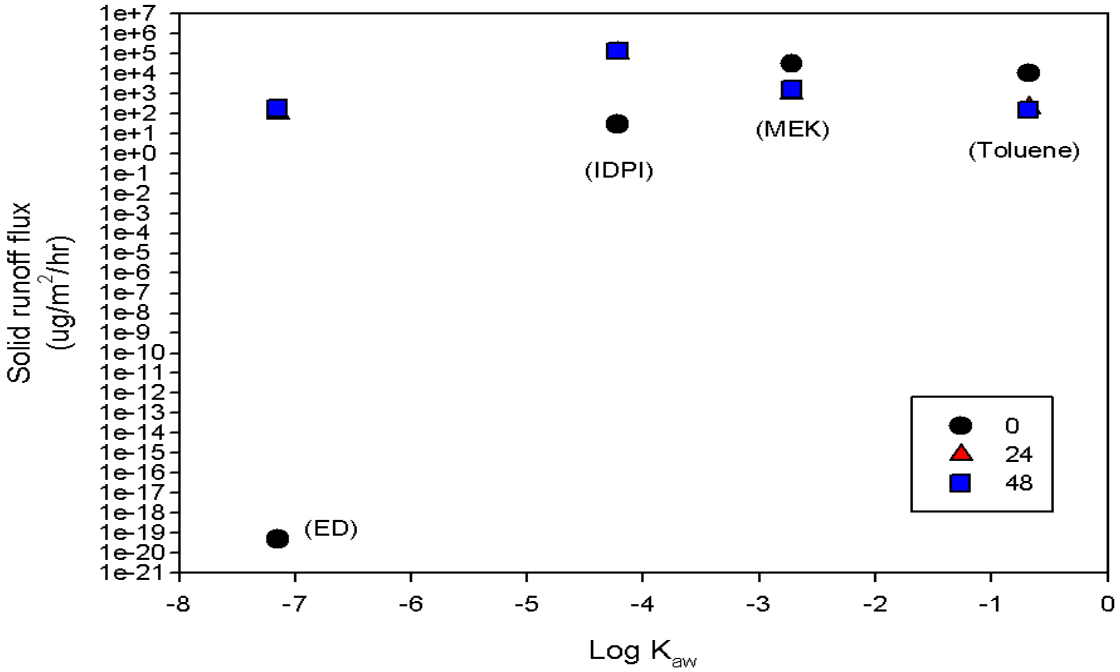
<그림 20-2> K_{aw}에 따른 저토에서의 각 강우 시기 별 오염도

<그림 20>에서 강우 조건 하에서 사고가 발생할 경우, 수체의 오염도는 K_{aw}가 증가함에 따라 선형적으로 증가한다. 하지만, 화학사고 발생 후에 시간 간격을 두고 강우가 발생했을 때 K_{aw}가 낮은 물질들은 강우 시기가 늦을수록 수체·저토 오염도가 증가했으며, K_{aw}가 높은 물질들은 강우 시기가 늦을수록 수체·저토 오염도가 감소하였다. 특히 K_{aw}가 제일 낮은 ED와 제일 높은 Toluene은 다른 물질보다 강우 시기가 늦어질 시 수체·저토 오염도의 더 큰 변화폭이 확인됐다. 또한 각 물성들의 강우 시기 변화에 따른 수체·저토 오염도 변화폭을 통하여, 사고 발생 후 24시간 뒤에 내리는 강우가 수체·저토 오염도 변화에 가장 큰 영향을 준다는 점을 확인하였다. 마지막으로, IDPI는 강우 시기가 늦을수록 수체·저토 오염도가 증가했고, MEK는 수체·저토 오염도가 감소하여, 그 사이 K_{aw} 값을 가진 물질의 경우, 강우 시기에 영향을 덜 받을 수도 있다는 점을 추측할 수 있다. 강우 시기가 늦어짐에 따라 침적 flux에 생기는 변화를 분석하기 위해, <그림 21>에 물성에 따른 각 강우시기 별 습식침적 flux를 나타냈다.

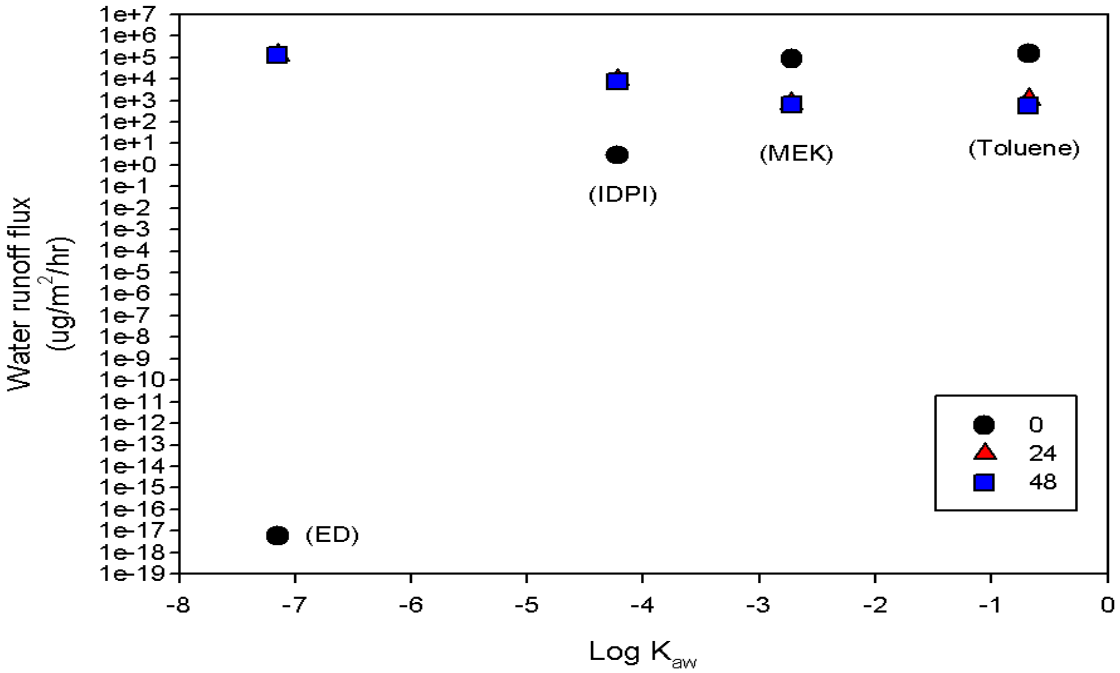


<그림 21> K_{aw}에 따른 각 강우 시기 별 습식침적 flux

모든 물질에 대해 사고 발생 후에 강우가 발생하면 대기 중의 오염물질이 건식침적을 비롯한 물질 이동 기작에 의해 감소한 상태이기 때문에 습식침적 flux는 감소하였다. 또한, 사고 발생 이후 강우가 발생하면 각 물질들의 습식침적 flux는 K_{aw}가 증가함에 따라 증가하는 경향이 관측되었다.



<그림 22-1> K_{aw}에 따른 각 강우 시기 별 수체로 유입되는 Solid Runoff flux



<그림 22-2> K_{aw}에 따른 각 강우 시기 별 수체로 유입되는 Water Runoff flux

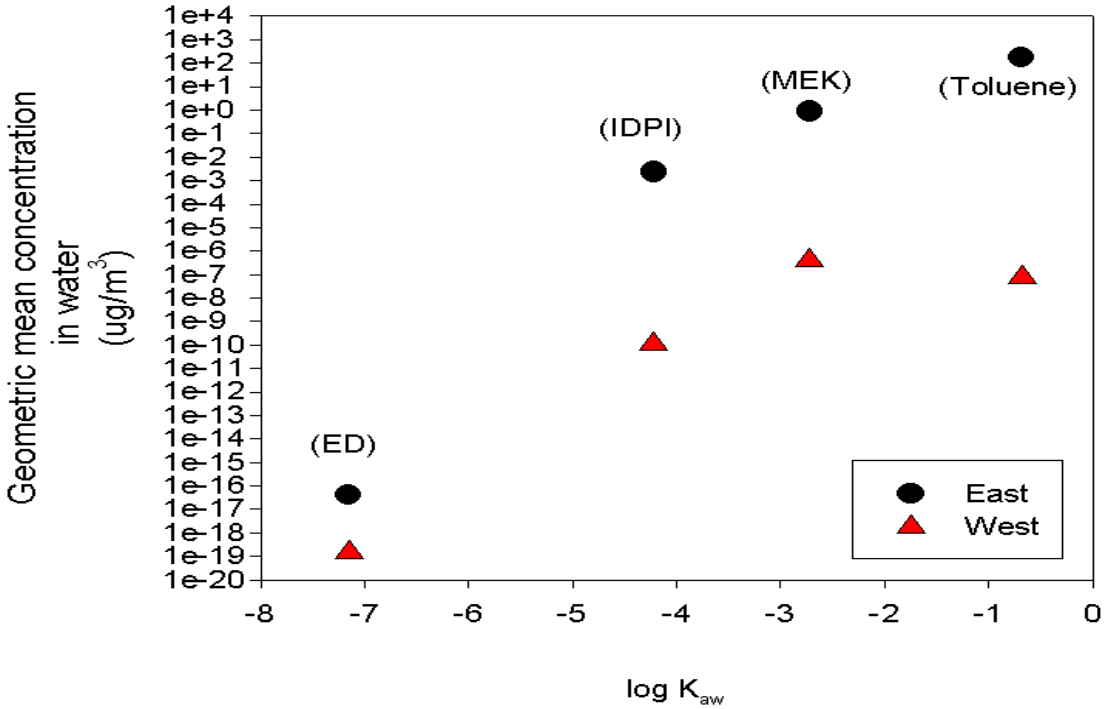
<그림 22>에 K_{aw}에 따른 각 강우 시기 별 Runoff flux를 나타냈다. IDPI를 제외한 모든 물질들은 강우 시기가 늦어짐에 따라 Runoff flux가 감소했으며, 특히 K_{aw}가 높은 MEK와 Toluene의 경우, Runoff flux의 감소폭이 ED보다 크게 나타났다. IDPI는 강우 시기가 늦어짐에 따라 Runoff flux가 오히려 증가하였다.

먼저 K_{aw}가 낮은 물질의 경우, 강우 조건 하에서 대기로 배출된 오염물질은 습식침적에 의해 빠르게 지표면으로 침적된다. 하지만 강우 시기가 늦어짐에 따라, 대기에서 충분히 확산이 일어나 건식침적을 비롯한 물질 이동 기작에 의해 수체로의 이동이 발생하며 강우 조건 하에서 화학사고가 발생할 때보다 상대적으로 수체로 더 많이 분배된다. 하지만 K_{aw}가 높은 물질의 경우, 강우 조건 하에서 화학사고가 발생하여도 수체까지 대기에서 오염물질이 충분히 확산되어 습식침적이 발생한다. 그렇기에 강우 시기가 늦어질수록 대기에서 제거되는 오염물질의 양이 증가하고 (Toluene은 ED 대비 사고 발생 후 1일 뒤 강우 발생 시, 10^3배 대기에서 더 많이 제거됨), 그로 인해 토양으로 이동하는 오염물질의 양 또한 감소하여 Runoff에 의해 수체로 유입되는 양은 감소한다. 따라서, ED와 IDPI가 강우 시기가 늦어질수록 Runoff flux가 증가한 이유는 다음과 같다. 이는 앞서 강우 강도에 설명하였듯이, ED와 IDPI는 높은 K_{oa}와 낮은 K_{aw}로 인해, 대기 중 오염물질이 빠르게 침적되어 사고지점에서 거리가 멀어질수록 오염도가 강우 강도와 반비례했다. 즉, 강우가 늦어짐에 따라 대기에서 충분히 확산하여 토양으로 이동하였고, 수체와 인접한 토양들의 오염도가 높아짐에 따라 강우 시기가 늦어질수록 Runoff flux가 증가하였다.

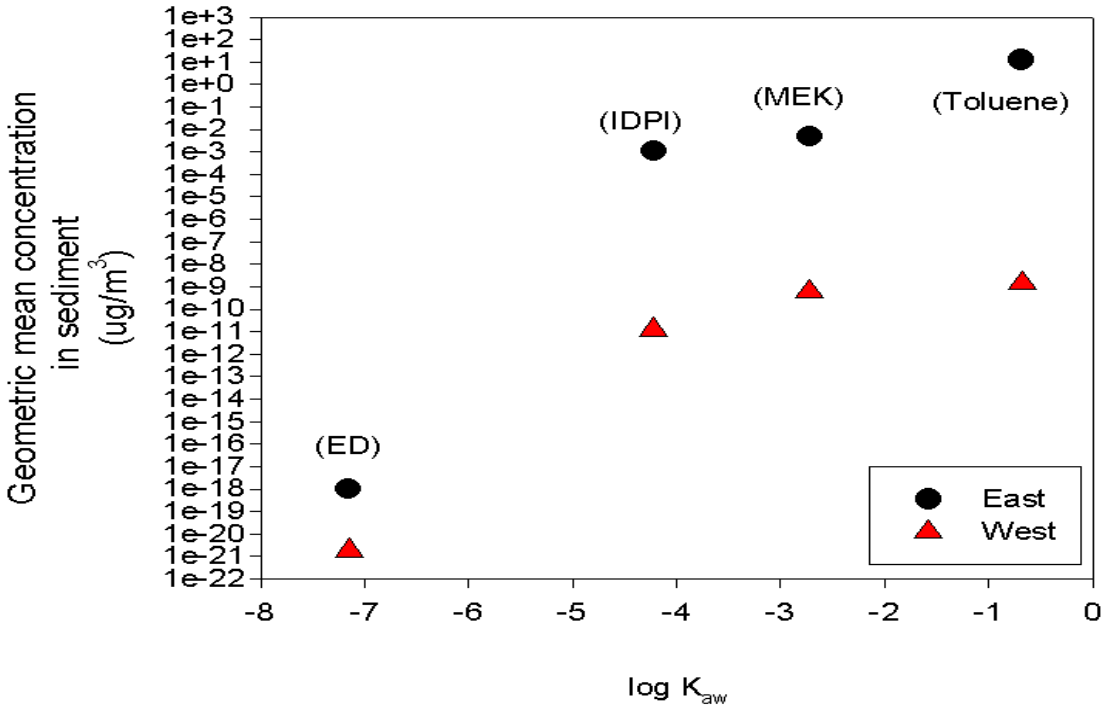
강우 시기에 따른 습식침적 flux와 Runoff flux의 변화를 살펴본 결과, K_{aw}에 따라 강우 시기에 따른 오염도 변화가 다르게 나타나는 이유는 다음과 같다. 낮은 K_{aw}를 가진 물질들은 강우 시기가 느릴수록 수체·저토 오염도가 증가하였다. 이는 비교적 느린 건식침적을 비롯한 다른 물질 이동기작에 의해 대기에서 충분히 확산이 일어나고 지표면으로 이동함에 따라 수체로 유입되는 오염물질의 양이 증가하였음을 의미한다. 반면에 K_{aw}가 높은 물질들은 강우 시기가 느릴수록 수체 저토 오염도가 감소하였다. 이는 대기에서 제거되는 오염물질이 증가하였으며, Runoff가 감소하였고, 습식침적 flux에 의해 침적되는 오염물질의 양이 감소하였기 때문이다.

4) 풍향에 따른 화학사고 영향

풍향에 따른 화학사고 영향을 분석하기 위해, <그림 23>에 강우 시기에 따른 수체·저토의 각 물질의 $C_i^{gm_core_x,t}$들의 기하평균으로 구한 대푯값을 나타냈으며, 부록에 각 물질의 시나리오 별 시공간 오염도 변화를 나타내었다.



<그림 23-1> 풍향에 따른 수체에서의 각 물질 별 오염도 변화
(East: 하천 방향, West: 하천 반대 방향)



<그림 23-2> 풍향에 따른 저토에서의 각 물질 별 오염도 변화

<그림 23>에서 풍향이 하천 방향일 때(E)와 반대 방향(W)일 때의 각 물질의 수체·저토 오염도를 비교했을 때 풍향이 E일 때 수체·저토 오염도가 W보다 약 2.44E+06배 더 높다. 이는 대기에서의 오염물질의 확산이 수체·저토 반대 방향으로 이루어져 대기에서 지표면으로의 주 이동 기작인 침적으로 침적되는 오염물의 양이 매우 적기 때문이다. 이는 풍향이 수체·저토의 오염도를 결정하는 주요한 요인이라는 점을 시사한다.

제 7 장. 결론

제 1 절 연구결과 요약

본 연구는 1) 화학사고에서 평가하지 않던 수체와 저토에 대해서 화학사고 영향을 평가할 수 있는 수체·저토 모듈을 개발하여 기존의 대기와 토양에 대해서 평가하는 화학사고 모형에 연결한 화학사고 다매체 환경 동태모형을 구현 및 평가, 2) 화학사고가 수체와 저토에 미치는 영향을 기상조건 시나리오들과 누출된 물질의 물성을 이용하여 분석하는 두 단계로 구성된다.

화학사고에 영향을 미치는 강우 조건은 1) 강우 강도, 2) 강우 지속시간, 3) 강우 시기, 4) 풍향이 있다. 본 연구에서는 4가지 조건에 대해 평가하기 위한 다양한 시나리오를 가정하여 사고를 모의하였으며 그 결과는 다음과 같다.

습식침적 flux와 Runoff flux를 중점으로 강우 강도가 증가함에 따라 K_{aw}가 낮을수록 습식침적 flux가 증가하며, 대기에 있는 오염물질이 상대적으로 사고지점에서 거리가 떨어진 수체에 도달하기 전에 많은 양이 습식침적에 의해 토양으로 침적됐기 때문이다. 또한, Runoff flux는 습식침적 flux와 토양 내 침출에 의해 영향을 받으며, K_{aw}와 K_{ow}가 낮을수록 Runoff에 의해 수체로 유입되는 양이 감소한다. 또한, K_{aw}가 -4와 -3일 때 IDPI와 MEK가 강우강도가 증가함에 따라 오염도의 변화 방향이 바뀌는 이유는 큰 K_{oa} 값으로 인해 K_{oa}값이 높으면 수체로 유입되는 양이 감소하고, 낮으면 수체로 유입되는 양이 증가했기 때문이다. 마지막으로 각 물질마다 수체와 저토의 오염도 비율은 K_{ow}가 높을수록 유입된 오염물질은 수체보다 저토에 더 많이 분배된다.

K_{ow}가 클수록 건식침적 flux는 증가했으며, 강우 지속시간이 증가함에 따라 습식침적으로 제거되는 오염물질의 양이 증가하여 건식침적 flux는 감소하였다. Runoff의 경우, 수체로 유입되는 양은 K_{aw}와 강우 지속시간에 비례하며, K_{ow}가 높은 물질의 경우, 침출에 영향을 덜 받아 Runoff에 의해 수체로 유입되는 양은 K_{ow}가 낮은 물질보다 많다. 따라서 K_{aw}와 K_{ow} 값이 낮은 물질은 강우 지속시간이 증가함에 따라, 큰 습식침적 flux로 인해 수체에 침적되는 양이 적고, 대기에서 습식침적으로

제거되는 양이 증가함에 따라 건식침적 flux는 감소하였다. 또한, 강우 지속시간이 증가함에 따라 침출에 의해 토양에서 제거되는 양이 증가하여 Runoff에 의해 수체로 유입되는 양도 감소한다. 그 결과, 다른 물질들과 다르게 강우 지속시간이 증가함에 따라 수체·저토 오염도가 감소했으며, 변화폭 또한 크게 나타났다. 반면에 K_{aw}는 낮으나 K_{ow}가 높은 물질의 경우, 상대적으로 침출에 의한 영향을 덜 받아 강우 지속시간이 증가할수록 Runoff로 수체로 유입되는 양의 증가가 다른 물질에 비해 크므로 다른 물질들보다 더 높은 수체·저토 오염도 증가율이 확인되었다.

강우 시기와 관련하여, 수체·저토 오염도에 가장 영향을 미치는 시기는 사고 발생 후 24시간 동안이며, 낮은 K_{aw}를 가진 물질들은 강우 시기가 느릴수록 대기에서 충분히 확산이 일어나 지표면으로 이동함에 따라 수체·저토 오염도가 증가하였다. 반면에 K_{aw}가 높은 물질들은 대기에서 제거되는 오염물질이 증가하여 지표면으로 이동하는 오염물질의 양이 감소했기 때문이다.

풍향의 경우, 동일한 강우 조건에서, 수체·저토 오염도는 풍향이 수체 방향일 때 약 2.44E+06배 높게 나타나 풍향이 수체·저토 오염도에 중요 요인으로 작용함을 확인하였다. 이는 대기에서 오염물질 확산이 수체·저토 격자의 반대 방향으로 이루어져 대기에서 수체로 침적되는 오염물의 양이 감소했기 때문이다.

제 2 절 연구의 한계점 및 의의

본 연구는 화학사고 실측자료 및 타 모형과의 비교가 불가능하여 신뢰성 평가를 위해 WASP와 화학사고 다매체 동태모형의 신뢰성 평가를 진행하였으나, 이는 완벽한 신뢰성 평가라고 평가하긴 힘들다. 추후 모형의 개선 및 평가를 하는 데 있어, 수체·저토 모듈에 대한 평가가 아닌 전체 모형에 대한 신뢰성 평가가 진행될 필요가 있다. 또한, 본 연구에서 지표면 격자를 구성하는 데 있어 낙동강을 제외한 지천은 반영하지 않았다. 일반적으로 지천의 유량이 하천보다 적어 같은 오염량이 유입돼도 더 큰 오염도를 나타낼 수 있음을 고려하면 추후 모형을 구동하는 데 있어, 지천을 반영한 모형 구동이 필요하다. 마지막으로, 본 연구에 사용된 연구물질은 총 4개로, 물성에 대한 상세한 분석보다는 간략한 분석에 멈췄다는 한계점을 가진다.

하지만, 본 연구를 통해 지금까지 평가되지 않던 수체와 저토에 대한 평가가 가능한 화학사고 다매체 동태모형이 구현되었고, 예측력이 평가되었다. 또한, 화학사고 발생 시 강우 요인, 풍향, 그리고 물성이 수체·저토 오염도에 미치는 영향을 분석하였다. 또한, 강우 요인, 풍향에 따라 수체·저토에서의 오염도 차이의 변화가 발생함을 확인하였고, 주요 물성에 따라 오염도 변화가 달라짐을 확인하였다.

100 ton의 규모로 Toluene이 누출되고 강우 강도가 20 mm/hr일 때, 수체 오염도가 약 1 ppb로 물질 중 제일 크지만 Toluene의 수질기준인 0.7 ppm 미만으로 나타났다. 하지만 본 모형에서 평가된 낙동강 보다 유량이 적은 지천의 경우, 오염물질의 유입에 따른 큰 영향을 받을 수 있다. 또한, 100 ton 규모 이상의 사고는 실제 2014 ~ 2020년 동안 3건이 발생했으며 수체·저토의 오염도는 일반적으로 누출량과 비례하기에 Toluene보다 K_{aw}가 큰 물질의 경우 수체·저토의 오염도가 더 큰 영향을 받을 수 있다. 그렇기에 화학사고 발생 시 특히 유량이 적은 하천과 K_{aw}가 큰 물질에 대해 수체·저토에 대한 오염도 평가가 중요함을 확인하였다.

본 연구의 평가 결과들은 향후 화학사고 다매체 동태모형의 정교화에 중요한 참고가 될 수 있다. 또한, 향후 화학사고 영향을 사전적 평가 혹은 사후 평가하는 과정에서의 수체·저토 오염도에 대한 예측 및 분석 필요성 및 물성에 기반한 화학물질의 수체·저토에 대한 위해도 사전 예측 가능성을 제시하였다.

참 고 문 헌

김진형, 정창모, 강석민, 용종원, 유병태, 서재민. (2017). 구미 불산사고 사례연구를 통한 예측모델 피해영향범위 비교, 한국화학공학회, 55(1), 48-53.

국립환경과학원. (2007). 하천 퇴적물 중 POPs 축적도 모니터링사업 (2)

신용승. (2009). 통합환경관리를 위한 매체 통합적 위해성 평가의 필요성 및 현황. 환경법과 정책, 2, 145-166.

윤태훈. (2011), 「응용수문학」, 청문각

장리아. (2019) "기후변화로 인한 VOCs와 PCDDs /DFs의 실내외 다매체 동태 변화와 그에 따른 오염도 변화 평가." 박사학위논문, 서울대학교 대학원.

정수희, 윤도영, 김영성. (1999). 주요 누출사고 예측 모델의 특성 비교, 한국대기환경학회지.

정경삼. (2015). "석유화학단지의 액체염소 누출 피해 모델링." 박사학위논문, 동신대학교.

한국수자원공사 (1996). 대하천에서 오염물질 이송확산과 저감대책에 관한 연구.

한국수자원공사 (1999). 대청댐 하류 오염물질 이송확산예측 및 저감대책에 관한 연구.

환경부. (2012). 표토의 침식 현황 조사에 관한 고시.

환경부. (2015). 2015 환경백서.

환경부. (2019). 홍수량 산정 표준지침.

Bloomfield, D P. 1999. An overview of validation methods for energy and environmental software. United States.

Borah, D. K., and M. Bera. (2004). Watershed-scale hydrologic and nonpoint-source pollution models: Review of applications, Trans. ASAE 47(3), 789-803.

Bubbico, R. and Mazzarotta, B. (2008). Accidental release of toxic chemicals: Influence of the main input parameters on consequence calculation, J. Hazard. Mater. 151, 394-406.

Chang, J., Hanna, S. (2004). Air quality model performance evaluation, Meteorol Atmos Phys 87, 167 - 196.

Cohen, Y. (1986). Organic pollutant transport, Environ. Sci. Technol. 20(6),

538-544.

Cope, B. Shaikh, T. Parmar, R., Literature Review on Nutrient-Related Rates, Constants, and Kinetics Formulations in Surface Water Quality Modeling, EPA/600/R-19/241, U.S. Environmental Protection Agency: Washington, DC, USA, 2020.

Dickhut, R. M., Gustafson, K. E. (1995) Atmospheric washout of polycyclic aromatic hydrocarbons in the southern Chesapeake bay region. Environ. Sci. Technol., 29, 1518-1525.

Donigian Jr A.S., Imhoff J.C. (2002) From the stanford model to BASINS: 40 Years of Watershed Modeling. Proceedings ASCE Task Committee on Evolution of Hydrologic Methods Through Computers. ASCE 150th Anniversary Celebration; 2002: 3 - 7. November; Washington, DC.

Duinker, J. C., Bouchertall, F. (1989) On the distribution of atmospheric Biphenyl congeners between vapor phase, aerosols, and rain. Environ. Sci. Technol., 23, 57-62.

Easton, Z.M., Fuka, D.R., White, E.D., Collick, A.S., Biruk Ashagre, B., McCartney, M., Awulachew, S.B., Ahmed, A.A., and Steenhuis, T.S. (2010). A multi basin SWAT model analysis of runoff and sedimentation in the Blue Nile, Ethiopia, Hydrol. Earth Syst. Sci. 14, 1827 - 1841.

Feijtel, T., Boeije, G., Matthies, M., Young, A., Morris, G., Gandolfi, C. (1998). Development of a geography-referenced regional exposure assessment tool for European rivers, J. Hazard. Mater. 61, 59-65.

Garrett, T.J., Avey, L., Palmer, P.I., Stohl, A., Neuman, J.A., Brock, C.A., Ryerson, T.B., Holloway, J.S. (2006). Quantifying wet scavenging processes in aircraft observations of nitric acid and cloud condensation nuclei, J. Geophys. Res. 111, D23S51.

Hanna, S., Dharmavaram, S., Zhang, J., Sykes, I., Witlox, H., Khajehnajafi, S., Koslan, K. (2008). Comparision of six widely-used dense gas dispersion models for three recent chlorine railcar accidents, Process Saf. Prog. 27, 248-259.

Hamby, D.M. (1994). A review of techniques for parameter sensitivity analysis of environmental models. Environ. Monit. Assess. 32, 135 - 154.

Hoffman, F, and Chiarappa, M L. Investigation of the behavior of VOCs in ground water across fine- and coarse-grained geological contacts using a medium-scale physical model. United States: N. p., 1998.

Jung, J.E., Kim, Y.K., Song, J.H., Lee, D.S. (2014). Development and evaluation of a dynamic multimedia model (ECORAME) for local scale assessment of aquatic ecological exposure to chemicals originating from sources in environmental media, Sci. Total Environ. 500-501, 103-112.

Kim, K.E., Jung, J.E., Lee, Y., Lee, D.S. (2018). Ranking surface soil pollution potential of chemicals from accidental release by using two indicators calculated with a multimedia model (SoilPCA), Ecological Indicators 85, 664 - 673.

Kim, H.S., Kim, S.K., Kim, J.G., Lee, D.S. (2016). Are the ratios of the two concentrations at steady state in the medium pairs of air-water, air-soil, water-soil, water-sediment, and soil-sediment?, Sci. Total Environ. 553, 52-59.

KEI. (2009). Sustainable spatial river planning for climate change.

Lal, R. (2001) Soil degradation by erosion, Land degradation & Development, 12(6), 519-539.

Lee, D.S., Jung, J.E., Kim, D.W., Kim, S.J, Kim, S.K. (2012) A new coherence test procedure of environmental quality objectives based on multi-media monitoring data and its application to polycyclic aromatic hydrocarbons in Korea, J. Hazard. Mater. 209-210, 129-136.

Lee, Y., Lee, D.S., Kim, S.K., Kim, Y.K., Kim, D.W. (2004) Use of the Relative Concentration To Evaluate a Multimedia Model for PAHs in the Absence of Emission Estimates, Environ. Sci. Technol. 38, 4, 1079-1088.

Lee, Y.A., Kim, H.S., Lee, D.S. (2019) Evaluation using a Multimedia Fate and Transport Model of Surface Water Pollution Potential of Organic Chemicals Accidentally Released into air during a Rainfall Event; TH208; SETAC: Pensacola, FL, USA.

Leo, A., Hansch, C., Elkins, D. (1971) Partition coefficients and their uses. Chem. Rev. 71, 525－616.

Ligocki, M. P., Leuenberger, C., Pankow, J. F. (1985a) Trace organic compounds

in rain-Ⅱ. Gas scavenging of neutral organic compounds. Atmos. Environ., 19, 1609-1617.

Ligocki, M. P., Leuenberger, C., Pankow, J. F. (1985b) Trace organic compounds in rain-Ⅲ. Gas scavenging of neutral organic compounds. Atmos. Environ., 19, 1619-1626.

Mackay, D. (2001). Multimedia Environmental Models: The Fugacity Approach, Second Edition (2nd ed.). CRC Press.

Mackay, D., & Thibodeaux, L.J. (Eds.). (2010). Handbook of Chemical Mass Transport in the Environment (1st ed.). CRC Press.

Maidment D.R. Arc Hydro: GIS for Water Resources. Redlands (CA), USA: ESRI Press; 2002. p. 68 - 86.

Mircea, M., Stefan, S., Fuzzi, S. (2000). Precipitation scavenging coefficient: influence of measured aerosol and raindrop size distributions, Atmos. Environ. 34, 5169-5174.

Pandaya, N., Gabas, N., Marsden, E. (2012) Sensitivity analysis of Phast's atmospheric dispersion model for three toxic materials (nitric oxide, ammonia, chlorine), J. Loss Prev. Process Ind. 25, 20-32.

Park, R.A., Clough, J.S., Wellman, M.C. (2008). AQUATOX: Modeling environmental fate and ecological effects in aquatic ecosystems, Ecol. Model. 213, 1 - 15.

Paul, R., Mondal, A., Choudhury, M.S. (2014). Dispersion modeling of accidental release of chlorine gas. Proceedings of the International Conference on Chemical Engineering 2014 ICChE 2014, 29-30 December, Dhaka, Bangladesh.

Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G., McCool, D., Yoder, D.(1997), Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) (Vol. 703), Washington, DC: US Government Printing Office.

Schwarzenbach, R.P., Gschwend, P.M., Imboden, D.M., 1993. Environmental Organic Chemistry, Wiley Interscience, New York.

Wang, D.G., Alaee, M., Byer, J., Liu, Y.J., Tian, C.G. (2011) J. Environ. Monit., 13, 1589-1596.

Wool, T., Ambrose Jr., R.B., Martin, J. L., Comer, A. (2002) The water quality analysis simulation program, WASP ver 6.0, Draft use manual, US Environmental Protection Agency-Region 4, Atlanta, Georgia, 2002.

Wool, T., Ambrose Jr., R.B., Martin, J. L., Comer, A. (2020) WASP 8: The next generation in the 50-year evolution of USEPA's water quality model, Water 12, 1398.

Wang, L. and Liu, H. (2007) An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling, Int. J. Geogr. Inf. Syst. 2, 193-213.

Yang, D., Herath, S., and Musiake, K. (2000) Comparison of different distributed hydrological models for characterisation of catchment spatial variability, Hydrol. Process 14(3), 403-416.

Yoo, M.J., Lee, Y.R., Kim, D., Jeong, M.J., Stockwell, W.R., Kundu, P.K., Oh, S.M., Shin, D.B., Lee, S.J. (2014) New indices for wet scavenging of air pollutants (O3, CO, NO2, SO2, and PM10) by summertime rain, Atmospheric Environment 82, 226-237.

Xu, S. Kropscott, B. (2014), Evaluation of the three-phase equilibrium method for measuring temperature dependence of internally consistent partition coefficients (KOW, KOA, and KAW) for volatile methylsiloxanes and trimethylsilanol, Environmental Toxicology and Chemistry, 33(12), 2702-2710.

Zhang, L., Cheng, I., Muir, D., Charland, J.-P. (2015) Scavenging ratios of polycyclic aromatic compounds in rain and snow in the Athabasca oil sands region, Atmos. Chem. Phys., 15, 1421-1434.

Zhu, H., Mao, Z., Wang, Q., Sun, J. (2013). The influences of key factors on the consequences following the natural gas leakage from pipeline, Procedia Eng. 62, 592-601.

Abstract

Development of a multimedia model to predict the effects of rain and properties of chemicals accidentally released on the contamination characteristics in the river water and the bottom sediment

Seung-Jae Mun
Department of Environmental Planning
The Graduate School of Environmental Studies
Seoul National University

Among chemical accidents that occur in Korea, leak-related accidents account for about 77% of all accidents, i.e., it is important to prepare measures to prevent and respond to leakage accidents. However, the models used to predict and evaluate chemical accidents are mainly limited to the atmosphere, and the models for evaluating water pollution do not sufficiently consider the deposition

of pollutants from the atmosphere. However, since chemical accidents pollute all environmental media by interaction between media, a model that reflects the dynamic characteristics of the chemical leaked by accident in each medium is necessary. In addition, in the case of rainfall, chemical substances are removed from the atmosphere to the surface by wet deposition, and chemical substances deposited to soil can contaminate water through runoff. However, the general models currently used are not able to evaluate the effect of rainfall sufficiently. Therefore, this study implemented an extended multimedia dynamic model for chemical accidents (CAM) that can quantitatively evaluate the contamination level for air, soil, water, and sediment. The reliability of model and the effects of chemical accidents on the water and sediment were analyzed through rainfall and wind scenarios, with the properties of the leaked chemicals.

As a result of reliability evaluation of CAM, the spatiotemporal prediction tendency of CAM with WASP8 was similar, and the C_{water} was in adequate range compared to that of WASP8. However, in the case of $C_{sediment}$, CAM predicted higher than WASP8. This was because the lower the K_{oc} of pollutants, the more adsorption-desorption between the water and the sediment, which WASP8 does not consider, acted as one of the main transport mechanism for the pollutants from the water to the sediment. However, since this mechanism is one of the main mechanism of chemical transportation between the media, it can be accepted as the advantage that CAM simulates the transport of pollutants more precisely than WASP8.

The effect of rainfall factors and the properties of the leaked chemical was analyzed via CAM by various scenarios. As a result, the contamination level of a C_{water} and $C_{sediment}$ was inversely proportional to K_{aw}, but under rainfall conditions, when log $K_{aw}>-3$, C_{water} was proportional to the rainfall factors. But when log $K_{aw}<-4$, C_{water} was was inversely proportional to rainfall factors. In addition, for chemicals with log K_{aw} between -4 and -3, it is less likely to be affected by rainfall. In particular, it was confirmed that rainfall for 24 hours after the accident had the greatest effect on C_{water} and $C_{sediment}$, and also the wind direction.

In this study, a chemical accident multimedia dynamic model was

implemented, and the effects of rain, wind, and chemical properties on chemical accidents were analyzed. The results of this study can be an important reference for the elaboration of future chemical accident prediction models, and also suggest that water and sediment contamination should be analyzed too in the process of pre- or post-evaluation of the impact of chemical accidents.

keywords : Chemical accident, Leakage accident, Multimedia model, Contamination of water and sediment, Prediction
Student Number : 2019-26158