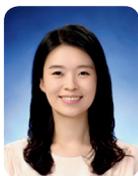


농산물 식중독 안전관리 패러다임의 전환 - 농촌유역 병원성 미생물 거동 모형 개발 -



홍은미
강원대학교 환경융합학부
/ 조교수
eunmi.hong@kangwon.ac.kr

1. 머리말

최근 우리나라에서는 급속한 경제발전으로 국민들의 고급화되고 다양한 식품에 대한 요구가 증가하고 있음에도 불구하고 이상고온, 가뭄, 폭염 등과 같은 기상이변과 예측 불가능한 환경변화로 식중독 발생에 대한 위험이 증가하고 있어 식품 안전성은 그 어느때보다 중요한 과제가 되고 있다. 기후변화대응 식품안전관리 연구사업단 (2014)에 따르면 기후변화로 인하여 식중독 발생이 5~10% 증가될 것으로 예측되고 있으며, 2016년 평년기온이 2015년 대비 0.2℃ 상승함에 따라 전체 식중독 환자수가 1.2배가량 증가 하였다 (식품의약품안전처, 2017).

우리나라 식중독 발생 원인을 분석해보면 식중독 발생 전체의 98% 이상이 미생물에 의한 식중독이었으며, 특히 최근 10년간 ('06-'15년) 식중독 발병 누적 건수 2위, 환자수 1위 원인 미생물은 병원성대장균이었다 (식품의약품안전처, 2017). 흔히, 식중독이라 하면 상한 음식을 생각하기 쉽지만 실제로 식중독의 큰 원인 중 하나는 병원성대장균에 의해 오염된 물과 채소 등 농산품 섭취에 의한 감염이었다. 실제로 최근 5년간 ('12-'16년) 우리나라 식중독 환자 10명 중 4명 (41.8%)이 채소류를 섭취하여 발병하였으며, 이는 육류 (14.2%)나 김밥 등 복합조리식품 (2.6%)보다 압도적으로 높은 수치였다. 이처럼 채소류 섭취에 의한 식중독 사고는 지속적으로 증가하는 추세이며, 국외에서도 채소류에서 *E. coli*, *B. cereus* 등 식중독균 노출에 의한 상추, 시금치, 토마토 등 오염이 증가하고 있다.

농산물 섭취로 인한 식중독의 발생 경로를 살펴보면, 재배단계에서부터 유통단계까지 전 단계에서 발생할 수 있으며 오염된 물이 강력한 전염원으로 작용할 수 있다. 농산물의 세척, 가공 단계에서는 병원성 미생물에 의해 오염된 물을 이용한 비위생적인 작업에 의해 노출될 수 있다. 재배 단계에서는 분변, 축산 폐수 등에 오염된 지하수, 하천수를 관개하여 채소를 재배하면 수확 직후 잎 표면이 토양 또는 물에 의해 노출된 병원성대장균에 의해 오염될 수 있다. 이처럼 농산물 식중독이 수질오염에 기인하여 발병함에도 불구하고, 수인성 전염 식중독 예방 및 농산물 식품 안전성 확보를 위한 수질오염의 원인 규명, 예측, 오염의 근본 원인을 찾기 위한 연구는 미비한 실정이다.

이에 축사, 영농, 하수처리장의 점·비점오염원 등으로부터 유역으로의 병원성 미생물 오염원 유입에 의한 농산물 식중독 발생이 증가하고있는 현 시점이, 유역 내 병원성 미생물 오염원 관리의 중요성에 대한 인식 재고가 필요한 시기라 판단된다. 따라서 본고에서는 농산물 식중독을 야기할 수 있는 농업유역 하천수 및 관개용수의 효율적인 관리를 위한 유역단위 병원성 미생물 거동 모델 개발의 필요성과 적용 사례를 기술하려 한다.

2. 병원성 미생물 거동 예측 모형 개발의 필요성

국외 선진국의 식중독 안전관리 대응 전략을 살펴보면, 대부분 식중독 안전관리 패러다임을 사후관리에서 사전예방으로 전환하여 원인규명, 초기대응, 관리 기법 개발 등으로 확대하고 있다. 한 예로, 미국의 경우 질병통제예방센터 (CDC, Centers for Disease Control and Prevention)

를 통해 'farm to the table' 전략을 제시하고 있다 (식품의약품안전처, 2017). 농작물 식중독을 예로 들면, 가축 분뇨, 장내 바이러스로부터 발생하는 병원성 미생물 균이 수문 순환과정에서 유입된 물을 관개에 활용하거나 가축 배설물이 노출된 토양에서 길러지는 농작물 등을 인간이 섭취함에 따라 인간에게까지 감염되는 경로를 단계별로 분석하고 있다. 하지만, 우리나라는 아직까지 유통·소비단계에서의 실태조사 및 검사에 편중된 사후대응방식의 구조를 갖고 있는 한계가 있어, 그림 1과 같이 환경, 생산 단계를 포함한 통합적 관리강화의 중요성이 언급되고 있다.

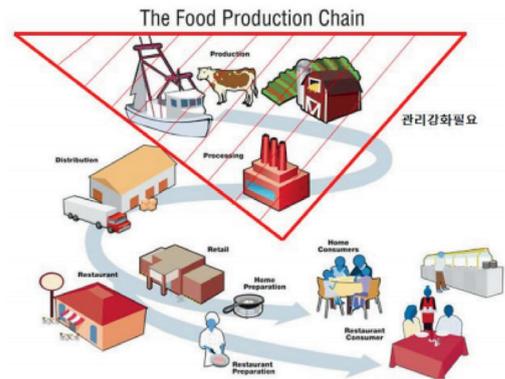


그림 1. 식중독 발생 전과정 중 환경, 생산에서의 관리의 중요성 (식품의약품안전처, 2017)

이에 우리나라에서도 농산물 식중독 안전관리에 대한 패러다임의 전환이 필요할 것으로 판단된다. 특히, 농산물 식중독 사전예방 및 예측을 위해서는 가축 분변 및 하수처리장 주변 미생물 오염에 따른 병원성 미생물 농도, 오염 경로 및 식중독 취약 지역 예측을 통한 지속적인 관리가 필요하다. 하지만 농업유역 미생물 거동 및 농도 예측에 있어 모니터링에는 시간, 공간, 예산 등의 한계가 있어, 모니터링과 더불어 농업유역 미생물 거동 모델의 개발 및 적용이 필요하다.

3. 병원성 미생물 거동 유역모형 개발 및 적용 사례

3.1 병원성 미생물 거동 유역모형 적용 사례

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 모델은 유역 내 오염물질 유출모의가 가능하고 수문순환 현상의 재현능력이 우수하여 전 세계적으로 수질오염총량관리연구에 널리 이용되고 있다. SWAT 모형의 박테리아 거동 모듈은 SWAT2000에 병원성 대장균 거동 기작을 처음으로 추가된 이후, SWAT2005에서 오염원 유입에 따른 수질 미생물 농도를 모의할 수 있도록 수정되었다. 하지만, 하천에서의 박테리아 사멸만 미생물 거동 모듈에 반영되어 있어 Kim et al. (2010)은 하천 유사에서의 박테리아 사멸 뿐 아니라 침적, 방출 (release) 등을 포함하여 모듈을 보완하였다. Hong et al. (2017)은 Kim et al. (2010)에서 보정된 결과를 활용하여, 미국 펜실베이니아 주 Cove Mt. 지역에서 관개용수 미생물 수질 관리에 있어 SWAT 모델을 활용한 FDA의 Food Safety Modernization Act (FSMA)의 적용 가능성을 판단하였다. 그림 2에서 볼 수 있듯이, SWAT 박테리아 모듈은 관개기간 (5-8월)에는 SWAT 모의 결과를 활용한 FSMA 규정이 모니터링 결과를 활용한 FSMA 규정을 잘 모의하는 것으로 분석되

었다 (CW, correct warning). 또한, 과거 100년 동안 기상자료를 활용하여 하천에서의 미생물 농도를 모의하여 FSMA 규정에 적용해본 결과, 약 16-70%가 수질기준을 초과하여, 농업유역에서 하천수를 관개에 활용할 경우 지속적인 관리가 필요할 것으로 판단되었다. 본 연구 결과는 SWAT 모델의 활용 가능성을 검증하였으며, 향후 관개수 수질 모니터링 가이드라인 및 정책 개발에 활용될 수 있을 것으로 분석되었다.

3.2 APEX 박테리아 모델 개발

3.2.1 SWAT 모델의 한계점 보완

3.1 에서와 같이 SWAT 모델은 농업유역에서 미생물 거동을 잘 모의하는 것으로 판단되었다. 하지만 SWAT 모델의 미생물 거동 모듈은 2002년 개발된 이후 Kim et al. (2010) 수정되었으나 그 이후 거의 보완되지 않았으며, 농업유역의 특성과 영농일지, 방목 등을 반영한 소유역·필드 단위의 분석에는 한계가 있었다. 또한, 유사 (sediment)에서의 박테리아의 생존과 사멸, 수위변동에 따른 미생물 거동 등 보완되어야 할 부분들이 많았다. 다른 미생물 수질 모의가 가능한 모형들도 있었으나 대부분 유역단위에서 미생물 거동 모의가 불가능 하며, 대중에 의한 이용

Location	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
CM2												
2008	FAW ^b	FW ^a	FW	CNW	CW	CW	CW	FAW	CW	FAW	FAW	CNW
2009	CW ^c	CNW ^d	CNW	CW								
CM3												
2008	FAW	CNW	FW	FW	CW	CW	CW	CW	CW	FAW	FAW	FAW
2009	CW	FW	FW	CW								
CM7												
2008	CW	FW	FW	FW	CW	CW	CW	CW	CW	CNW	FAW	FAW
2009	FW	FW	FW	FW	CW	CW	CW	CW	FAW	CW	CW	CW

^a FW: False Warning.
^b FAW: Failure to Warn.
^c CW: Correct Warning.
^d CNW: Correct No Warning.

그림 2. Model performance in terms of compliance to the FDA Food Safety Modernization Act regulations (Hong et al., 2017)

가능성도 낮았다. APEX (Agricultural Policy/ Environmental eXtender)는 현재 농업 정책에 활용되는 대표적인 유역·필드 수질 모델 중 하나임에도 불구하고 APEX는 미생물 거동을 모의할 수 있는 모듈은 개발되어 있지 않았다. 따라서 Hong et al., (2019)은 APEX 모델에서 구현 가능한 유역 내 육상 및 하천에서 분뇨에 기인한 박테리아 거동 모듈을 개발하였다.

3.2.2 APEX에 적용 가능한 미생물 거동 모듈 개발 및 검증

APEX 미생물 거동 모듈의 개발을 위해 적용된 데이터 및 미생물 거동 기작은 그림 3와 같다. 과거 연구자들에 의해 개발된 모듈 내 기작, 모니터링 결과, 변수, 지배방정식 등을 그림 3와 같이 나열하고 모듈에 반영하였다. 구체적으로는 그림 4(3)과 같이 토지에서는 분뇨에서의 박테리아 침적량, 침식량 분뇨 시비 시 시간 흐름에 따른 박테리아 생존율 등을 고려하였다. 하천에서의 박테리아 거동은 수위가 높을 때 유사의 재부유에 의한 박테리아 이동, 기저 유출에서의 박테리아 성장,

유사로의 박테리아 이동, 생존 등을 고려하였다.

모델의 기본 매개변수 값은 현장 실험 결과나 기존 연구에서 참고하였으며, 뉴질랜드의 Toenepi 유역의 모니터링 결과를 활용하여 새롭게 개발된 APEX 미생물 거동 모듈을 검증하였다 (그림 4). 검증 연구 대상 지역의 주요 토지이용은 방목지였으며, 매일 가축분뇨 시비가 발생하는 지역이었다. 모델 모의 결과 유역 최종 배출구에서 하천 유량 뿐 아니라 박테리아 농도도 잘 재연함을 확인하였다 (그림 5). 특히, 기존 모델들은 저유량시 박테리아 농도를 과소 모의하는 경향이 있었는데, 본 모델에서는 일정 수위 이하에서는 미생물 농도가 증가하는 현상을 잘 모의하여 농업유역에서 관개용수가 필요한 건기에도 미생물 거동 모의가 잘 반영된 모델임을 확인하였다. 본 연구에서 개발된 APEX 미생물 거동 모듈은 향후 영농에 따른 유역 내 미생물 거동을 예측하고, 관개용수 관리를 위한 모니터링 기준 개발, 미생물 농도 관리 규제 및 관리 기법을 지원하는데 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

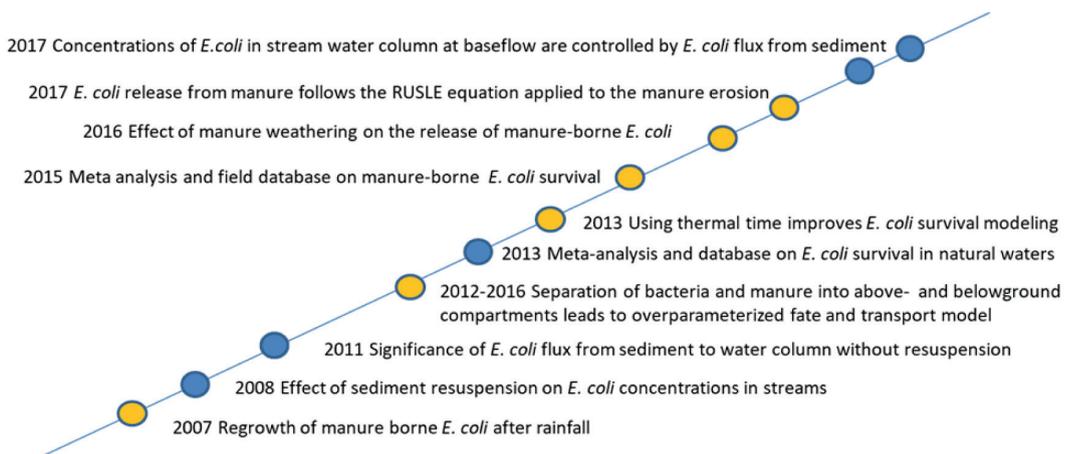


그림 3. Timeline of Novel Concept/Data included in the APEX Bacteria Fate and Transport Subroutine

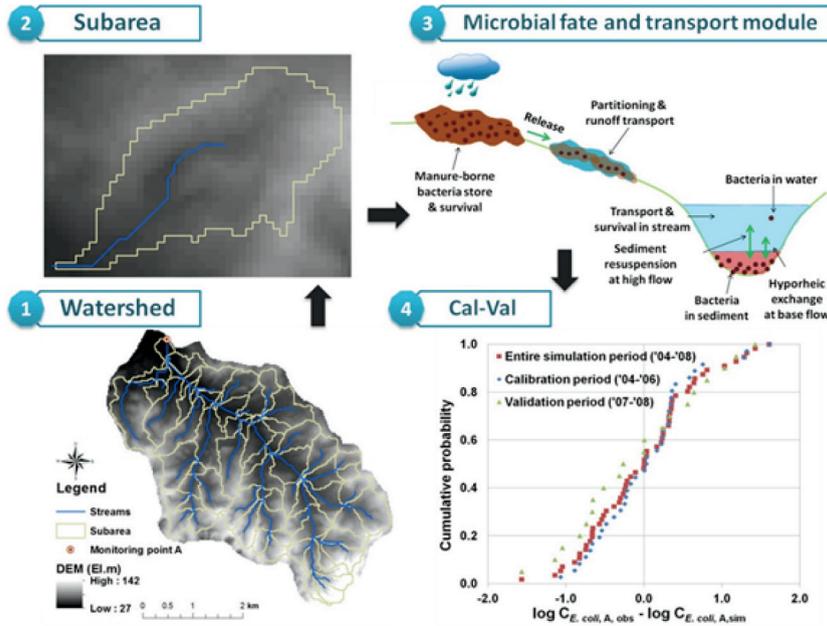


그림 4. Research procedure for microbial fate and transport module development (Hong et al., 2019)

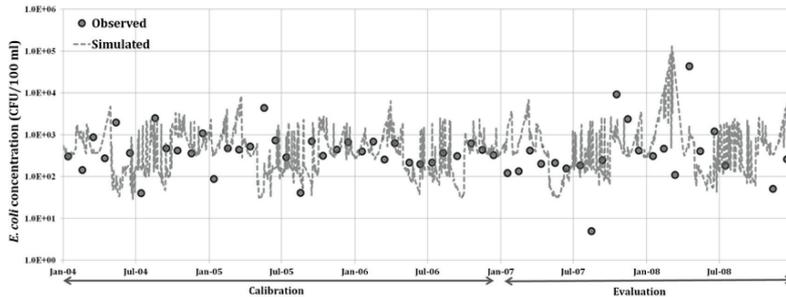


그림 5. Observed and simulated E. coli concentrations at the outlet of the watershed showing the model calibration and evaluation time (Hong et al., 2019)

4. 결론

유역환경에서 병원성 미생물 거동을 모의하고 예측하기 위한 모델 개발 및 적용은 농업유역 수질관리 및 의사결정에 중요한 역할을 한다. 또한, 미생물 거동 모형은 수질 농도를 반영한 환경 정책 및 식중독 취약성에 대한 보건 정책의 우선순위를 정하는데 정책 결정 모델로서 중요한 역할

을 할 것으로 판단된다. 물론 SWAT, APEX 등 유역모델에서 구현 가능한 미생물 거동 모듈이 개발되긴 하였으나, 질소나 인 등의 영양물질과 비교하여, 국내 농업유역에서의 병원성 미생물 오염원 배출 특성, 거동 및 최종 사용자를 고려한 미생물 거동 모델의 적용은 아직까지 미흡한 실정이다. 국내에서 수인성 전염병과 병원성 미생물에 의해 야기되는 식품 안전성에 대한 개념을 사후 관리에서 유

역 내 오염원 사전 관리와 예측으로 패러다임을 전환하고, 합리적인 연구성과를 확보하기 위해서는 한국 유역환경에 맞는 모듈, 파라미터 등에 대한 연구가 장기적으로 필요할 것으로 판단된다.

향후 지속적인 모니터링과 모델 개발, 적용 연구가 지속된다면, 유역 내 농촌 비점오염원, 생활하수, 축산폐수 포함 수생태환경 그리고 대기로부터 수계로의 병원성 미생물 오염원 유입으로 인한 수인성 전염성과 식중독 취약성을 예측할 수 있을 것이다. 그리고 병원성 미생물 오염 취약 지역을 미리 파악하고 관리함으로써 과거 사후 역학조사 및 관리에 초점을 맞춘 식품 안전성 관리에서 병원성 미생물 오염원 원인 조사를 통한 관리 방식으로 전환 가능할 것이다. 또한, 관개용수의 미생물 수질 농도를 예측하여 농산물 출하 시 안전성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

사사 : 본 기고문은 Hong et al., (2017 ; 2019) 연구 결과를 바탕으로 작성되었음.

the Agricultural Policy/Environmental eXtender (APEX) model, Science of the Total Environment 615: 47–58

5. Kim et al., 2010. Effect of streambed bacteria release on E. coli concentrations: monitoring and modeling with the modified SWAT. Ecol. Model. 221, 1592–1604

참고문헌

1. 국립농업과학원, 2009. 농식품중 유해미생물 오염실태조사 및 위해요인 구명, 2009년도 국가 농업 R&D 시험연구사업보고서
2. 식품의약품안전처, 2017. 식중독 안전관리 분석 및 평가 최종보고서
3. Hong et al, 2017. Modeling the interannual variability of microbial quality metrics of irrigation water in a Pennsylvania stream, Journal of Environmental Management 187: 253–264
4. Hong et al, 2018. Development and evaluation of the bacterial fate and transport module for