



비점원오염 연구에 관한 고찰

최 중 대

(강원대학교 농업생명과학대학 조교수)

1. 서 론

비점원오염에 관한 관심은 최근들어 많이 증가하고 있다. 수질 혹은 환경관련 학회의 논문집 또는 환경과 관련된 민간단체 등에서도 대도시의 상수원을 포함하는 하천과 호수 수질에 많은 영향을 미치고 있는 비점원오염을 규제해야 한다고 주장하고 있다. 그러나 우리나라에서 발표되는 비점원오염에 관한 논문이나 기사들을 미국 등 비점원오염에 관한 많은 연구를 하는 국가의 논문이나 기사와 비교하여 볼 때, 상당한 거리감을 느낄 수 있다. 이는 비점원오염에 관한 인식은 국내외의 학술논문이나 기사를 통하여 빠르게 확산되고 있는 데 비하여 국내에서 실험을 통하여 비점원오염에 관한 우리나라의 조건에 맞는 실험 연구를 하는 연구자는 매우 제한되어 있어 논문이나 기사들이 단순히 미국의 EPA 자료집 등을 모방하는 수준에 있기 때문이다.

자연을 대상으로 하는 현장실험은 실내실험과는 달리 통제할 수 없는 인자들이 많아 이론보다는 실험경험이 연구의 결과에 중요한 변수로 작용한다. 선진국에서 일반적으로 사용하는 실험방법의 원칙을 이해하고 적용하여 우리나라에서 발생하고 있는 비점원오염의 질과 양을 정량적으로 파악할 필요가 있다. 지역과 토지이용에 따라 상이한 비점원오염의 발생, 운반(transport), 운명(fate) 및 토양과

수질에 미치는 영향이 정량적으로 파악된다면 비점원오염을 통제하기 위한 효율적인 기술과 경제적인 정책들이 개발될 수 있을 것이다. 본고에서는 이와 같은 점을 고려하여 미국에서 시범연구사업을 수행하며 습득한 일반적인 연구방법과 주의할 방법 등에 관하여 고찰하여 국내의 비점원오염에 관한 이해를 증진하고 현장실험연구를 활성화하는 데 기여하고자 한다.

2. 비점원오염의 정의

비점원오염은 영어로 non-point source pollution 혹은 약어로 NPS pollution으로 point source pollution(점원오염)이 아닌 모든 오염을 지칭하고 있다. 미국 Clean Water Act의 Section 502(14)에 기술되어 있는 점원오염의 정의는 다음과 같다. "The term 'point source' means any discernible, confined and discrete conveyance, including but not limited to any pipe, ditch, channel, tunnel, conduit, well, discrete fissure, container, rolling stock, concentrated animal feeding operation, or vessel or other floating craft, from which pollutants are or may be discharged. This term does not include agricultural storm water discharges and return flows from irrigated agriculture." 정의에 따르면 점원오염은 현재 오염이 배출되고

있는 오염원 뿐만아니라 배출될 가능성이 있는 오염원도 점원오염원으로 규정하고 있으며 예외조항으로 농업에서의 유출수는 점원오염의 범주에서 제외하고 있다. 초기의 비점원오염에 관한 연구는 농지나 농업지대에 국한되어 있었으나 도시지역이나 도시근교에서도 많은 비점원오염물질이 발생되고 있는 것으로 밝혀져 이들 지역으로 부터의 도시비점원오염(urban nonpoint source pollution)을 차단하기 위한 연구가 많이 수행되었고 이에 대한 대책이 개발되어 추진되고 있다.

우리나라에서 사용되는 Non-point source pollution은 비점원오염, 비점오염원, 비점오염 혹은 면오염 등으로 그리고 point source pollution은 점원오염, 점오염원 혹은 점오염 등으로 사용되고 있다. Non-point와 point source pollution의 구분은 오염물질의 배출이 특정한 좁은 지점에서 배출되는가의 여부에 따라 구분되며 영어에 충실히 번역한다면 비점원오염과 점원오염 혹은 비점오염과 점오염으로 사용하는 것이 비점오염원 혹은 점오염원으로 사용하는 것 보다 옳을 것이다.

3. 비점원오염의 연구방법

비점원오염에 관한 연구는 비점원오염물질이 왜 발생되고, 어떻게 얼마나 운반되며, 운반되는 도중 어떠한 변화과정을 거치며, 그리고 하천이나 호수에 도달하였을 때 수질에 미치는 영향은 얼마나 큰가 하는 질문에 답변할 수 있도록 계획되고 실험설계되며 자료가 수집되어야 한다. 과학적인 실험설계에 하에 수집된 자료는 “어떻게 하면 비점원오염물질의 발생을 최소화할 수 있는가?”, “어떻게 하면 발생한 오염물질의 이동을 최소화할 수 있는가?”, “오염물질이 이동시에 받는 물리적, 화학적, 생화학적 및 생물학적 작용은 오염물질의 성질을 어떻게 변화시키는가?” 그리고 “상기한 과제들

을 수행하기 위하여는 어떠한 기술과 정책이 개발되어야 하는가?” 하는 질문에 답할 수 있도록 분석되어야 한다.

비점원오염 연구는 경지단위의 연구(field scale study), 유역단위의 연구(watershed scale study), 그리고 지하수 수질에 관한 연구로 구분할 수 있다. 경지단위의 연구는 단위농지에서 작물의 작부체계, 경운방법, 비료와 농약의 사용방법 및 사용량, 지표잔유물의 관리 등을 변화시키며 경지로 부터 유출되는 유출량과 수질을 경지의 출구에서 측정(edge-of-field water quality)하고 농업생산성을 모니터링한다. 측정된 유출, 수질 및 농업생산성을 비교하여 경지의 농업생산성은 유지를 할 수 있으면서도 유출량은 작고 수질은 양호하게 유지시킬 수 있는 영농방법을 찾아내는 데 연구의 목적을 두고 있다. 또한 경지 유출수의 수질을 개선하기 위한 방법으로 경지주위에 일정한 폭의 풀밭을 조성하여 유출과 함께 발생하는 유사와 여러 영양염류를 거르기 위한 거름대(vegetative filter strip, VFS)를 설치하고 VFS가 유출수량, 유사 및 각종 영양염류의 농도에 미치는 영향에 대한 연구를 한다. 경지유출수의 수질을 개선하기 위하여 VFS외에도 하천변 수림(riparian forests)과 같은 중간지(intervening land)를 효율적으로 관리하기 위한 다양한 방법이 도입되고 이들의 효과를 측정하기 위한 연구가 진행되고 있다. 그림 1은 VFS의 효과와 중간지에서 지하수의 수질변화를 측정하기 위한 모니터링 시스템을 개략적으로 보여주고 있다. 그러나 그림 1에 경지에서 유출되는 유출수량과 수질을 측정하기 위한 시스템을 경지경계에 설치하고 또한 경지에서 유출된 유출수가 하천으로 유입될 때에도 경지경계에 설치한 시스템을 설치하면 경지에서 유출된 유출수가 VFS와 하천변 수림 등을 지나면서 받는 수질의 변화를 종합적으로 측정할 수 있다. 이상의 연구는 첫째 경지를 잘 관리하여 경지

에서 유출되는 오염물질을 최소화하고, 둘째 중간지를 잘 관리하여 경지에서 유출된 오염물질이 하천에 유입하기 전에 최대한으로 제거하여 수질을 보호하자는 목적을 지니고 있으며 농업 비점원오염 연구의 가장 기본적인 연구방법이다.

유역단위의 연구는 단위경지, 부락, 공원, 하천변 수립을 포함한 숲, 방목지 혹은 가축사육장(feed lot) 등이 복합적으로 존재하는 유역에서 수질과 토지이용을 모니터링하며 시작된다. 본격적으로 유역의 최적관리방법이 도입되기 최소한 2년전부터 연구대상유역의 토지이용, 유출량 그리고 수질을 주기적으로 모니터링하며 기초자료를 축적한다. 기초자료를 분석하면 유역의 오염발생원을 개략적으로 추정할 수 있게 된다. 다음에는 유역에서 가장 많은 오염물을 배출하는 토지이용 방법을 바꾸면서 유출량과 수질을 계속적으로 모니터링하며 토지이용의 변화가 수질에 미치는 영향을 평가하게 된다. 유역단위의 연구는 상당히 많은 자연인자들이 수질과 유출에 영향을 미치기 때문에 기초자료의 수집이 충분히 이루어진 후 수행되어야 한다. 성급한 마음으로 3년이나 4년 동안에 유역단위의 연구를 수행하려 한다면 성공보다는 실패할 가능성이 월등히 높다. 이와 같은 이유로 미국과 캐나다에서는 10년 이상 혹은 심지어는 20년 정도까지 지속적으로 유역의 토지이용 및 수질과의 관계를 모니터링하며 연구하고 있는 곳도 있다. 토지이용의 변화는 단순히 농경지에만 국한되는 것이 아니라 가축사육장의 관리, 하천관리, 중간지 관리, 농가의 하수처리 방법의 변화 등 연구대상유역의 오염배출원과 관계있는 모든 토지이용에 관계된다. 특히 이들 토지들은 대부분이 개인의 소유로 되어 있어 연구자가 의도한 대로 토지이용을 변화시키기 어려운 경우가 많다. 따라서 유역단위의 연구는 농림부나 환경부와 같은 정부기관이 반드시 함께 참여하고 토지이용 변화에

따른 토지소유주의 수입감소나 불편에 대한 보상이 반드시 이루어져야 한다. 유역의 유출량과 수질을 모니터링하기 위하여는 유역의 출구에서는 물론 토지이용이 변화되는 모든 상류부의 지류에도 종합적인 모니터링 시스템이 구축되고 운영되어야 하기 때문에 상당한 시설비와 인건비의 투입이 요구된다.

지하수 수질에 관한 연구의 목적은 농경지에 살포되는 농약과 비료가 지하수 수질에 미치는 영향을 측정하기 위하여 수행된다. 따라서 유역단위의 연구보다는 그림 1에서와 같이 단위경지와 인근의 중간지를 대상으로 하는 연구가 많다. 비료와 농약의 종류, 사용량 및 사용시기, 강우, 경운방법, 작물의 종류 등을 변화시키면서 비료와 농약의 침투량을 측정한다. 불포화 지역에는 라이시미터나 텐서미터를 토양 깊이별로 설치하고 토양수분을 추출하여 수질 분석을 하고 지하대수층에는 관측정을 설치하여 지하수질을 측정한다. 라이시미터 등과 관측정은 지하수의 흐름을 고려하여 경지의 중앙과 가장자리에 설치하고 작물의 생육기별로 지하로 침투하는 농약과 비료의 양을 측정한다. 경지를 지난 지하수가 중간지를 지나면서 받는 수질의 변화를 측정하기 위하여 중간지의 특성에 따라 그림 1과 같이 관측정들을 설치하고 수위와 수질을 측정한다. 지하수질의 모니터링 시에는 지표식생의 상태는 물론 토양의 종류별로 물리적, 화학적인 조성 및 수리학적 특성, 투수계수, 토층과 지하수층의 두께 등이 상세히 조사되어야 한다.

4. 비점원오염 연구의 일반적인 원칙

비점원오염 연구는 토지 소유주가 서로 다른 농경지를 대상으로 수행해야 하는 경우가 대부분이고 연구의 성패는 이들 토지 소유주의 참여도에 많은 영향을 받는다. 비점원오염 연구를 위하여는 기존의 토지이용 및 영농방법의

변화가 뒤따르게 되고 이로 인하여 유발되는 농업인의 불편사항을 보상하고 농업시설을 보완하거나 교체하는 데 소요되는 비용의 일부 혹은 전부를 지원하여 줄 수 있는 연구유역 지원책이 반드시 마련되어야 농업인들의 참여를 유도할 수 있다. 단순한 금전적, 기술적인 지원만으로는 불충분하기 때문에 연구유역의 농업인에게 연구의 중요성, 목적, 필요성 등을 교육시키고 연구에 참여시켜야 하는 데 이와 같은 일은 연구원이 직접 일대일로 농업인과 대면하여 설명하고 설득하는 방법이 가장 효율적이다. 또한 비점원오염의 문제점, 연구과제의 개발 등 연구계획단계부터 농업인들을 참여시키면 보다 많은 농업인들이 연구수행에 자발적으로 참여하므로 연구가 매우 효율적으로 추진될 수 있다.

토지이용변화에 따른 연구유역의 수질변화를 측정하기 위하여는 최소한 2년 이상의 기초수질 및 유출자료의 수집이 필요하다. 기초자료의 수집이 충분할 때 토지이용방법을 변화시키며 수질을 측정하면 토지이용의 변화가 수질에 미치는 영향을 정량적으로 측정할 수 있다. 기초자료의 수집이나 토지이용변화에 따른 수질의 변화를 측정하기 위한 자료의 수집은 많은 연구비와 장시간이 소요되는 어렵고 힘든 연구지만 비점원오염을 통제하기 위한 기술과 정책의 개발로 얻어지는 혜택에 비하여는 상대적으로 작은 비용이다.

최소의 농약과 비료를 필요할 때 마다 여러 번 주는 비료 및 농약 최적관리방법과 무경운이나 최소경운을 하는 최적관리방법이 최소의 경비로 유역의 수질개선을 도모할 수 있는 방법이다. 비점원오염 연구의 효과를 입증하기가 상당히 어렵기 때문에 여러 가지 최적관리방법이 수질에 미치는 영향을 과학적으로 입증하기 위하여는 수질지표변수(water quality indicator variable)와 자료관리 방법을 적절하게 선택하여야 하며 또한 수질이 변화하는 경향을

반드시 파악할 수 있도록 철저한 실험계획이 이루어져야 한다. 수질의 변화 경향을 효율적으로 입증하기 위하여는 유역의 형상, 토지이용, 수문학적 특성 등이 비슷한 2개의 유역(paired watershed)을 선정한다. 한 유역에는 최적관리방법에 의한 토지이용을 바꾸면서 그리고 다른 한 유역은 기존의 농방방법을 유지하면서 수질을 장기간 모니터링한다. 수집된 자료를 이용하여 두 유역의 수질변화 경향을 비교평가하여 최적관리방법을 적용한 유역의 수질이 다른 유역의 수질에 비하여 개선되고 있다는 경향을 입증하는 연구방법이 가장 효율적인 비점원오염 연구방법으로 인정받고 있다.

비점원오염 연구는 투자되는 연구비에 비하여 효과를 입증하지 못하는 경우가 매우 많으며 따라서 연구자체의 효율성을 상실하게 되어 더 이상의 연구가 불가능하게 될 수 있다. 시범연구유역의 설정과 실험의 수행은 철저한 실험계획하에 수행되어야 하고 최적관리방법이 유역의 수질개선에 지속적으로 공헌하고 있다는 자료를 확보하는 것이 중요하다.

5. 비점원오염 연구시 고려해야 할 사항

비점원오염에 관한 연구는 수없이 많은 인공 및 자연인자들이 복합적으로 작용하기 때문에 농림부나 환경부의 공무원 몇사람이 정책을 입안하고 수행하기에는 위험부담이 너무나 크다. 농림부, 환경부 그리고 대학 등의 전문가로 구성된 위원회를 구성하고 이 위원회에서 비점원오염에 관한 연구의 방향, 연구의 목적, 과제의 선정, 모니터링 계획의 관리, 자료의 분석 및 보고서 작성, 연구기간 등에 대하여 관리 및 감독하도록 하는 것이 바람직하다. 여러 정부기관이 참여하는 경우는 전담공무원을 고정적으로 배치하여 다른 연구기관과 업무의 공조가 원활히 이루어져 연구흐름이 지속적으로 유지될 수 있도록 해야 한다.

비점원오염에 관한 연구는 개인사업체에서 수행하기 어려우므로 정부의 예산지원으로 수행될 수 밖에 없다. 본 연구는 여러 학문분야가 참여하는 공동연구로 수행되어야 하며 연구비의 지원은 순수한 연구비외에도 연구에 참여하는 농업인에 대한 교육, 기술적인 지원, 보조금 및 성과금 지원, 수질과 토지이용 변화를 모니터링 하기 위한 비용, 행정비용, 경제성 분석비용, 연구전담 전문가 채용비용 등이 포함되도록 충분히 지원되어야 한다.

비점원오염 연구의 가장 중요한 목적중의 하나인 토지이용 변화가 수질에 미치는 영향을 파악하기 위하여는 지속적인 모니터링이 가장 중요하다. 수질 및 토지이용 모니터링은 토지이용을 최적관리방법으로 바꾸기 전, 바꾸는 도중 및 바꾼 후의 수질의 변화과정을 정확하게 측정할 수 있도록 법적, 제도적 및 금전적인 지원이 확실히 이루어질 수 있을 때 시작하여야 한다. 또한 비점원오염 연구의 복잡성, 장기성 및 계절적인 연구업무의 집중성 때문에 여러 가지 업무를 동시에 다루는 공무원이나 대학의 전문가들이 연구의 지속성을 유지하며 연구를 수행하기가 매우 어려우므로 전담연구인력을 반드시 고용하여 연구수행을 책임질 수 있도록 연구비의 지원이 필수적이다.

비점원오염 연구는 전래적인 영농관리방법 대신 최적관리방법을 도입하여 농업생산성은 유지할 수 있으면서도 농업활동으로 부터 비점원오염물질의 배출을 최소화할 수 있는 방법을 찾고 이를 실험적으로 입증하는데 목적이 있다. 따라서 최적관리방법을 적용하여 가시적인 효과를 볼수 있는 곳을 시범연구구역으로 정하는 것이 중요하다. 또한 연구수행중이라든가 연구의 효과를 유지할 수 있으면서도 필요에 따라 최적관리방법을 부분적으로 혹은 전면적으로 바꿀수 있도록 융통성을 부여할 수 있도록 한다. 구역단위의 연구는 최적관리방법을 적용하여 수질의 개선이 이루어질 수 있는 유

역을 반드시 선택하여야 한다. 대표구역의 오염배출원이 명확히 파악되고 연구의 목적이 현실적으로 실현가능하도록 설정되어야 한다. 따라서 장기적인 비점원오염 연구를 시작하기 전에 여러 지역에 사전 답사를 위한 선행연구가 이루어지고 이에 기초하여 장기적인 연구가 계획되고 수행될 수 있도록 하는 것이 효과적이다. 선행연구를 통하여 우리나라의 실정에 적합한 연구모형을 설정할 수 있고 이에 기초하여 대규모 연구프로젝트를 개발할 수 있다.

비점원오염 연구에서 충분한 자료가 수집되면 비점원오염을 효율적으로 통제할 수 있는 기술과 정책이 개발될 수 있다. 그러나 위에서 설명한 모니터링을 비롯한 연구사업은 정말로 지루하고 어려우며 많은 예산이 투입되는 장기적인 연구인 반면에 현재 우리나라의 연구비 지원기관에서 요구하는 짧은 기간 동안에 많은 연구논문을 생산해 낼 수 있는 연구는 절대로 못된다는 단점이 있다. 또한 본 연구는 현재 농어촌특별세로 추진되고 있는 현장애로기술개발사업이나 첨단기술개발사업과 같이 연구사업의 목적을 농업생산성의 향상이나 경제성을 증진하기 위한 것으로 둘수도 없다. 그러나 이와 같은 연구자료가 없이는 우리 실정에 맞는 효율적인 비점원오염 통제대책을 개발하기는 불가능하며 또한 컴퓨터 모델의 개발도 어렵게 된다. 미국 등의 선진국에서는 상기에서 설명한 연구들을 지역적으로 다양하게 수없이 많이 반복하여 수행하였고 또한 많은 자료를 축적하고 다양한 수학적 모델들을 개발하였다. 기초적인 연구자료가 없는 상태에서 우리나라 고유의 모델개발은 상상조차할 수 없으며 외국에서 개발된 좋은 모델을 사용한다 하여도 우리나라의 실정에 맞게끔 모델을 검증할 수 없기 때문에 모델을 사용할 때와 결과를 해석할 때 많은 제약을 받게 된다. 기초 모니터링 자료는 많으면 많을수록 좋으며 가능하면 많은 지역에서 많은 연구가 이루어져야 우리나라에서도 비

점원오염을 효율적으로 통제할 수 있는 대책이 개발될 수 있을 것이며 수학적 모델도 많이 개발될 수 있을 것이다. 농업 비점원오염에 관심 있는 농림부, 환경부, 대학 및 연구소의 관계자들이 팀을 형성하여 장기적인 연구과제를 개발하고 자료를 수집하고 분석하여 우리나라의 비점원오염 통제기술 및 정책을 개발할 수 있기를 간절히 바란다.

6. 요약

비점원오염은 하천 및 지하수 수질오염에 많은 기여를 하고 있는 것으로 나타나고 있는 반면에 우리나라에서는 비점원오염에 관한 연구는 상대적으로 미약한 것으로 지적되고 있다. 본 기사에서는 비점원오염에 대한 이해를 증진

하고 현장실험연구를 활성화하는 데 기여하기 위하여 미국 등의 선진국에서 실행하고 있는 현장실험방법을 경지단위의 연구, 유역단위의 연구, 그리고 지하수 수질에 관한 연구로 구분하여 고찰하였다. 비점원오염에 관한 현장연구 방법, 연구시 중요사항, 고려하여야 할 사항 등에 관한 자료는 "Gale, J. A., D. E. Line, D. L. Osmond, S. W. Coffey, J. Spooner, J. A. Arnold, T. J. Hoban, and R. C. Wimberley. 1993. Evaluation of the Experimental Rural Clean Water Project, NCSU Water Quality Group, Biological and Agricultural Engineering Department, North Carolina State University, Raleigh, NC, EPA-841-R-93-005"에 자세히 기술되어 있다.

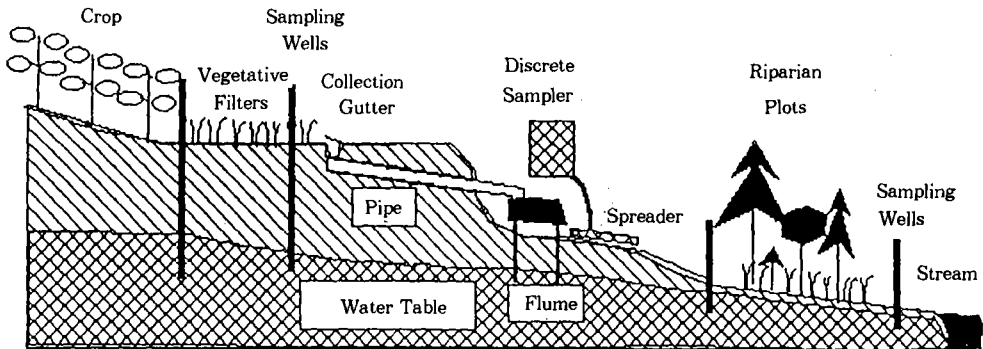


그림. 1. 비점원오염을 정량적으로 분석하기 위한 지표수 및 지하수 수질 모니터링 시스템의 예