

총 설(II)

수돗물 바이러스 오염과 검출시험법의 과학적 의미

정 용 석

경희대학교 문리과대학 생물학과

1. 수돗물바이러스란 무엇인가?

바이러스는 살아 있는 세포 내에서만 복제와 증식이 가능한 '필연적 세포내 기생체'이다. 감염한 세포 내에서 증식되어 일단 세포 밖으로 방출된 개개의 바이러스 입자(virion)는 새로운 감염대상에 침투할 때까지 복제나 증식을 비롯한 물질대사를 수행하지 않는 상태로 존재하며 박테리아부터 고등동물에 이르기까지 지구상에 존재하는 모든 생물 종(species)은 다양한 바이러스의 감염대상이 된다. HIV(human immunodeficiency virus)와 같이 사람에게 감염되는 바이러스를 포함, 수많은 동물 바이러스(animal virus)는 바이러스의 유전체(genome)를 둘러싸 보호하는 외부구조를 기준으로 크게 두 그룹으로 나눌 수 있으며 이중 바이러스 입자의 외부가 지질이중층(lipid bilayer: virion envelop)으로 덮인 형태는 세포 밖으로 방출된 후 제한된 시간 내에 새로운 감염대상을 찾아 침투하지 못할 경우에는 자외선을 비롯한 다양한 환경 요인에 의하여 대부분이 짧은 시간 내에 감염능력을 잃게 된다. 그러나 엔테로바이러스(enterovirus)를 비롯, 견고한 외각 단백질만으로 유전체를 보호하는 형태의 바이러스 그룹은 숙주세포를 떠난 뒤에도 토양, 지표수 및 대기 등의 자연환경에서 노출될 수 있는 여러 가지 물리·화학적 손상요인들에 강한 내성(resistance)을 나타내며 수주에서 수개월 이상 감염능력을 보유한 채로 자연환경에 존재할 수 있다.

따라서 인간에게 감염될 수 있는 수많은 동물바이러스들은 사람이 생활권을 형성하여 살고 있는 일상적 생활환경의 거의 대부분에서 접촉할 수밖에 없으며 더욱이 사람에게 감염되는 바이러스의 대부분은 기존에 감염된 사람의 몸에서 복제하고 증식되어 방출되므로 결국은 우리의 생활권에서 가장 가깝게 분포한다. 지표수와 토양은 사람의 생활환경에서 끝없이 배출되는 분변과 생활하수의 대부분을 직·간접으로 받아들이는 자연환경이며 환자의 몸에서 배출되는 감염성 바이러스의 대부분을 포함할 수밖에 없다. 또한 지표수의 순환과정은 반드시 토양을 거치게 되므로 궁극적으로는 생활환경에서 접촉하게 되는 환경바이러스들의 상당수가 물에서 발견되는 수인성 바이러스이다. 이들은 기존에 감염된 환자의 분변을 통해 방출된 후 분변에 오염된 토양이나 지표수 등의 자연환경에 존재하다

가 사람이 일상생활을 영위하는 동안에 접촉 가능한 수많은 경로를 통해 새로운 감염대상의 구강을 통해 침투, 다시 감염 생활사를 반복하는 전형적인 '분변-구강 전파형' 감염경로를 따른다. 일반적으로 수인성 바이러스란 식수, 패류 취식, 생활용수, 수영을 비롯한 일체의 물놀이 관련 수환경 등의 경로를 통해 전파 및 감염되는 바이러스 종류를 포괄하며 수인성 바이러스의 전파경로로서 오염된 물에 의한 접촉을 우려하지 않을 수 없으나 수인성바이러스 관련 질병의 대부분을 차지하는 로타바이러스(rotavirus)의 감염이 영·유아기의 어린이가 모여 생활하는 '놀이방'이나 탁아소 등에서 집중 발생하는 현상은 환자의 분변오염이 동반된 여하한 경로를 통해서 가능하다는 점을 지적하고 있다.

이렇듯 우리의 몸에서 쏟아내는 바이러스의 상당량은 일정한 정화과정 및 하수처리과정을 거쳐 호소와 하천을 중심으로 한 지표수로 집약된다. 지표수의 일정지역은 상수원으로 선정되어 수돗물생산에 필요한 원수를 공급하고 취수된 상수원수는 소독과정을 포함한 일정기준과 단계의 정수처리과정을 거쳐 각 가정용수로 공급되는 것이다. 이상의 과정을 거치는 동안 바이러스의 대부분은 구조가 손상되거나 혹은 토양에 의해 걸러지기도 하고 염소소독과 같은 화학적 처리에 의해 초기 오염부하의 99.99%까지 줄어들지만 상수원수에서의 바이러스 부하가 지나쳐 표준정수처리과정만으로 적정수준까지 감소시키지 못하거나 또는 수돗물생산 및 공급의 제 과정 중 어느 한 곳이라도 소홀하게 될 때 우리는 이 바이러스들을 수돗물에서까지 발견하게 되며 우리는 이 바이러스들을 소위 '수돗물 바이러스'라고 부른다. 결국 수돗물 바이러스의 문제는 어느 특정단계나 지역에 국한된 것이 아니라 사람이 살고 있는 전 지역의 환경관리로부터 출발하는 것임이 자명해진다. 1966년 프랑스의 Coen 등에 의해 검출되기 시작한 수돗물바이러스는 그 종류만도 100여종에 이르며 각 생활집단마다의 사회적, 지역적 특성에 따라 검출되는 바이러스의 종류와 양이 다양하게 나타나는 것으로 보고되고 있다. 현재 대표적인 수돗물바이러스의 그룹은 폴리오바이러스(poliovirus), 콕사키바이러스(coxsackievirus), 에코바이러스(echovirus) 등을 위시한 다양한 엔테로바이러스 그룹, A형 간염바이러스(hepatitis A virus), 그리고 E형 간염바이러스(hepatitis E virus)와 노와바

이 러스(Norwalkvirus) 등을 포함한 켈리시바이러스(calicivirus), 로타바이러스(rotavirus), 아데노바이러스(adenovirus) 등을 들 수 있으며, 코로나바이러스(coronavirus) 및 아스트로바이러스(astrovirus) 그룹도 물에서 간혹 발견되고 있음이 보고된 바 있다. 이상의 바이러스들이 일으킬 수 있는 가능한 질병의 종류만도 수십 가지에 달함을 고려할 때 수돗물바이러스의 오염문제는 결코 간과할 수 없다.

물론 수돗물바이러스의 문제는 우리 나라에만 국한된 문제가거나 예전에는 없다가 최근에서야 발생된 현상은 결코 아니다. 어쩌면 최근 수년간 뜨겁게 달아오르고 있는 논쟁과 공방도 우리도 이 문제를 짚어 볼 수 있는 계기와 경제적, 사회적, 그리고 과학기술 여건이 성숙되고 있음을 반증한다는 느낌에 일견 스스로 대견하기까지 하다. 그러나 1940년대부터 대도시의 하수를 대상으로 폴리오바이러스 검색을 시도한 바 있는 미국과 유럽을 포함한 선진국들은 '환경바이러스학' 분야의 연구에 이미 50년 이상의 역사를 가지고 있으며 우리는 이제 걸음마 단계에 있다. 이 분야의 연구는 바이러스 이외에도 각종 수인성 미생물 및 정수, 설비 등 각 분야의 전문인력들이 모두 힘을 합해야 비로소 문제해결을 위한 의미 있는 접근이 가능하다. 안타깝게도 국내에서는 지난 4년 동안 각 특정집단의 연구결과가 서로 일치하지 않는다는 문제로 각자의 연구결과만을 배타적으로 수용하며 심각한 상호불신의 멍에에 매여 있다. 이와 같은 불신의 근본이 서로의 연구내용과 결과를 잘못 이해하고 있음에서 비롯되었다면 빠른 시일 내에 이를 명확히 하고 우리 모두는 서둘러 문제해결을 위한 다음 단계로 나아가야 한다.

2. 환경시료에서의 바이러스 검출방법론

수계환경시료로부터 바이러스를 검출하는 방법론을 주제로, 지난 50여 년 동안 발표된 연구논문 만도 수 백 권을 상회한다. 환경시료로부터 바이러스를 검출하는 방법론의 기본골격은 시료에 따라 다양하지만 다량의 물시료에서 바이러스를 검출할 경우에는 ① 필터 등의 다양한 매질을 이용, 물 속에 분포한 저농도의 바이러스 흡착(adsorption), ② 필터에 흡착된 바이러스 입자의 유리(elution) 및 농축(concentration), ③ 농축시료 접종에 의한 배양세포 감염, 그리고 ④ 세포병변현상(cytopathic effect: CPE)에 기준한 바이러스 오염의 최적확수(Most Probable Number of Infectious Unit: MPNIU/100L) 산정, 즉 정량적 판단과 바이러스 유전물질 검색을 기준으로 한 바이러스 오염의 정성적 판단 과정으로 요약된다. 또한 검출단계나 오염 바이러스의 종 동정(identification) 단계에 (RT)-PCR 등을 이용하여 연구 목적에 따라 필요한 추가정보의 확보가 가능하게 된다. 최근 세계적인 추세는 미국 환경청에서 표준공정시험법(Standard Operating Procedure: SOP)의 생물산업

로 공시한 ICR/TCVA를 많이 이용하고 있으나 한편으론(RT)-PCR 만에 의한 유전자 검색법의 약점, 즉 검출 바이러스의 감염성 여부확인이 어려운 점을 보완하여 1996년 Reynolds 등이 개발, 보고한 'Integrated Cell Culture(RT)-PCR: ICC-PCR'의 유용성에 대하여 다양한 평가가 이루어지고 있어 검출 방법론의 단계적 발전이 기대된다. 지금까지 학계에 보고된 검출방법론은 크게 10여 가지로 분류할 수 있지만 여기서는 표준공정시험법으로서의 가치를 확보한 미국 환경청의 ICR-TCVA와 고도의 민감도 및 작업효율성을 장점으로 부각되고 있는 ICC-PCR 두 검출방법론을 비교해 보았다.

1) ICR-TCVA by US EPA

"Virus Monitoring Protocol for the Information Collection Requirement Rule: EPA/814-B-95-002(June 1995)"은 미국 환경청(United States Environmental Protection Agency)이 미 전역의 상수원수(source water) 및 정수과정을 거친 처리수(finished water)에서 사람의 장바이러스(human enterovirus)의 오염여부 및 오염수준을 정성적·정량적 결과로 수집하여 그 실태를 분석한 후 먹는 물 관리를 위한 국가정책에 반영하기 위해 수립하여 사용하고 있는 "Standard Operating Procedure: SOP"로서 우리말로는 "표준공정시험법" 또는 "표준공정과정"에 해당하는 의미를 갖는다. SOP를 Webster's Ninth New Collegian Dictionary에서는 다음과 같이 정의하고 있다. "established or prescribed methods to be followed routinely for the performance of designated operations or in designated situations" 즉, 다양한 지역에서 다양한 시료를 다양한 연구자들이 시험을 수행한다 하더라도 동일한 목적에 위하여 균질한 연구결과와 생산을 도모하기 위해서는 시험의 첫 단계부터 마지막 단계까지 표준화된 방법론이 적용되어 다양한 조건에 따른 시험결과와 표준편차를 최소화하려는 필연적 의도를 갖는 것이 표준공정시험법의 기본이다.

2) Total Culturable Virus Assay

먹는 물에서의 바이러스 검출 및 정량을 위해 미국 환경청이 공시한 virus monitoring protocol은 전체 시험과정을 크게 두 단계, 즉 물시료에서의 바이러스를 농축하는 제반 과정과 농축시료를 배양세포에 접종하여 감염성 바이러스 입자의 존재여부를 판정하고 존재하는 바이러스 입자의 수를 확률적으로 산출하는 제반 과정이다. 동물바이러스의 감염성 바이러스 입자를 확인하는 방법은 살아 있는 대상 숙주동물개체에, 또는 감수성 있음이 확인된 동물세포에 감염하여 바이러스 복제에 수반된 질병의 징후나 세포병변현상을 확인하는 것이 유일하다. 즉, 살아 있는 바이러스의 감염 연구에서는 '배양세포 접종과정'을 빼고는 실험이 불가능하며 바이러스연구에 배양세포를 이용한 역사는 수 십 년 이상이다. 실제 전세계의 바이러

스 연구자들은 수많은 종류의 배양세포주를 이용하여 다양한 형태의 배양세포접종법을 각자의 실험목적에 따라 나름대로 적용하며 ICR에서는 표준공정시험법의 목적에 따라 고유의 "Total Culturable Virus Assay(TCVA)"를 "establish" 또는 "prescribe"한 것이다. 이미 알려진 바와 같이 TCVA에서는 BGM(Buffalo Green Monkey Kidney Cell)이라는 한 종류의 특정 세포주와 특정 영양배지 및 배양세포접종의 제반 과정을 지정하고 있다. 그렇다면 BGM 세포주는 모든 수돗물바이러스를 검출하는 목적에 최선의 선택인가 하는 의문이 제시된다. "최선"의 선택이란 바로 선택의 "목적"에 달려 있다. ICR에서는 100여종이 넘는 모든 수돗물바이러스 중 가장 많은 종류(69종)가 포함된 그룹인 엔테로바이러스를 배양 및 검출 목표로 하였다. 물론 ICR-TCVA를 수립에 참가한 수십 명의 바이러스 연구진 및 관련자들이 나머지 장관바이러스를 무시하거나 혹은 검출하는 방법을 몰라서 이와 같은 선택을 한 것은 분명히 아니다. 수 백 종이 넘는 배양세포주와 100여 종의 수돗물바이러스를 조합하면 엄청난 수의 선택이 가능할 것이다. 그러나 TCVA는 BGM 세포주를 통해 엔테로바이러스의 오염 수준을 판단함으로써 분원성세균이나 박테리오파지(bacteriophage: bacterial virus)의 존재여부만으로는 가능하기 어려운 바이러스오염의 전반적인 수준을 확률적 의미에서의 최적확수로 가능하려는 것이다. 따라서 ICR-TCVA는 각 단계에서의 제반 과정, 즉 전체 농축시료의 평균 85% 이상을 subsample 1과 2로 나누어 20개의 배양세포에 중복접종하며 각 subsample을 다시 계대배양하거나 각 접종세포 그룹의 80%(10개 중 8개) 이상이 양성을 보일 때는 단계회석과정 후 다시 30개에 접종하는 등의 일체를 지정하고 궁극적 확률을 산출하기 위해 제작된 "MPN software program"에 각 단계의 양성 및 음성 판정된 수를 도입하여 MPN/mL 및 상하의 95% confidence limit value를 계산하는 일련의 정형화된 틀을 제시하는 것이다.

수돗물바이러스 모니터링을 위한 ICR-TCVA에서는 검출된 바이러스의 종류를 동정하는 단계는 규정하지 않고 있다. 물 시료에서 검출된 바이러스가 어떤 종류인가에 대한 과학적 관심은 누구에게나 공통이지만 먹는 물에서의 바이러스 오염수준을 가능하기 위해 지표바이러스로서 엔테로바이러스의 검출을 목표로 한 ICR-TCVA에서 바이러스 종류를 확인하는 경우는 positive control에 의한 carry-over contamination을 확인, 배제하려 함이며 우리의 경우처럼 체계적 역학조사를 수반하지 않은 상태에서 검출 바이러스의 종류에 만 초점이 맞춰지면 그저 호기심의 해결 수준에서 객관성 없는 추측성 위해우려만을 양산할 수밖에 없다.

3) Polymerase Chain Reaction(PCR)과 Integrated Cell Culture-PCR

일반적으로 바이러스의 검출방법으로서는 농축된 바이러스 시료의 세포배양을 통한 감염 입자의 수 및 감염성 여부(plaque assay 또는 면역형광법)를 확인하거나 바이러스의 유전체의 일부를 방사성 또는 비방사성 표지의 cDNA probe 또는 RNA probe로 hybridization(Dot blot, Slot blot)을 수행, 직접적인 검출을 시도하는 방법이 사용될 수 있고 직접적인 관찰 방법으로 전자현미경법 또는 특이항체를 부가적으로 활용한 면역전자현미경법도 활용된다. 최근에는 PCR에 의한 바이러스 유전자의 증폭과 hybridization법을 연계하여 기존 방법론의 비교적 낮은 민감도를 $10^2 \sim 10^7$ 배까지 끌어올리는 PCR/hybridization 방법론이 소개되면서 그 유용성을 검증받고 있다. RNA 바이러스의 유전자를 검색할 경우에는 RT-PCR/hybridization 법을 이용한다.

그러나 바이러스 검출 방법론의 적합성 여부는 검출 민감도, 검출 특이성, 검출결과의 재현성 및 검출 방법론의 경제성이 모두 고려되어야 한다. 검출 민감도에 있어서는 바이러스 유전자, 특히 RNA 유전자의 경우 역전사 과정에 의한 cDNA 단일나선의 합성과 뒤이은 PCR에 의한 증폭, 그리고 증폭된 PCR 산물을 방사성 또는 비방사성 표지 DNA probe로 Southern blot hybridization을 수행하는 것이 가장 뛰어나다. 이 경우, 증폭된 PCR 산물을 직접염기서열 결정법으로 염기서열을 확인하게 되면 증폭부위에 따라서는 검출바이러스의 동정도 가능하므로 중화항체법과 병행한 동정 또는 단독으로도 1차 동정의 방법론으로 적용할 수 있다는 점에서 매우 유용하게 쓰일 수 있다. 일반적으로 검출 특이성은 항체를 사용한 면역형광법, 면역전자현미경법 등이 PCR/hybridization에 비해 뒤지지 않으나 다수의 시료를 분석해야하는 경우에는 검사과정의 경제성은 취약하다. 그럼에도 불구하고 PCR/hybridization에서의 양성반응이 반드시 바이러스의 감염성을 나타내는 것은 아니기 때문에 배양세포접종에 의한 검출 바이러스의 감염성 확인은 반드시 병행되어야만 한다. PCR에 의한 유전자 검색법의 가장 큰 문제점은 높은 민감도에 비례하는 위양성(false positive) 반응의 확률이다. 이러한 위양성 반응의 최소화는 ① 실험시 검색시료에 대응하는 엄격하고 적절한 대조군의 구축, ② PCR 반응물에 의한 carry-over 오염 환경의 조정, ③ 세포배양에서의 감염성 분석결과와의 상호보정 등에 의한 방법들로 가능하다.

1996년 4월 Arizona 대학의 Reynolds, Gerba 및 Pepper는 하수의 1차 처리수에서 농축한 바이러스를 BGM 세포주에 접종하고 1, 2, 3, 5, 10 또는 14일 동안 배양하여 CPE 발생 전후 각각에 세포의 lysate를 대상으로 RT-PCR을 시도, 세포내의 복제 중인 바이러스 유전체를 검출하는 방법론에 대하여 학계에 발표하였다. 위 저자들은 이 방법을 'Integrated Cell Culture-PCR'이라고 명명하고 ICR/TCVA에서 CPE를 확인하기 위해 3~14일을 기다리는 과정을 단축시켜 접종 후 24시간-

7일 이내에 바이러스 존재유무를 확인할 수 있다는 점과 PCR의 적용에 따라 다소 상승시킬 수 있는 검출 민감도, 그리고 경우에 따라서는 BGM 세포주에서 명확한 CPE를 확인하기 힘든 hepatitis A virus 및 rotavirus 등도 검출 가능성이 높아질 수 있다는 점을 장점으로 제시하고 있다. 그러나 최종 농축된 시료를 1차 접종하고 접종된 세포의 supernatant나 lysate를 대상으로 PCR 증폭을 시도할 경우에는 농축시료에 남아 있던 바이러스 유전물질이 그 감염성 여부에 관계없이 PCR에 의해 증폭되어 대부분 검출되는 위양성 반응을 가져올 수 있는 점이 이 방법의 문제점으로 지적될 수 있었다. 즉, 원래의 농축시료로써 섞여있는 바이러스 유전물질의 잔류 가능성을 최대한 낮추는 과정이 고려되어야 하며 최근 미국 환경청과 대학 연구실에서는 이와 같은 장점 및 단점들의 상승과 보완을 위해 ICC-PCR 방법에 대한 평가가 진행중이다.

4. 검출방법론 공방 유감

1997년 김상중 교수의 연구결과가 언론에 공표된 이후 서울시와 김교수 사이에 수년 동안 진행되어온 공방의 핵심은 김교수가 바이러스검출을 위해 사용한 연구방법이 표준공정시험법이 아니므로 그 결과를 '인정' 또는 '신뢰'할 수 없다는 서울시의 입장과, 현재 가장 높은 검출 민감도와 함께 검출 바이러스 감염성 여부확인에 대한 약점을 보완한 연구결과를 인정하고 그 결과에 따른 대응정책을 설정할 것을 주장하는 김교수 사이의 팽팽한 입장 차이로 요약된다. 서울시에 공급되는 일부 상수원수와 서울 및 부산시 수돗물을 대상으로 엔테로바이러스와 아데노바이러스 검출을 시도한 이 연구는 1990년대 초반 학계에 보고된 아데노바이러스 및 엔테로바이러스 검출용 PCR primer sets를 적용하여, 위 두 바이러스 그룹을 검출하는 증폭과정에서 두 종류의 primer set를 함께 섞어 반응(duplex PCR)해도 각각 검출될 수 있다는 가능성을 제시하였다. 또한 비록 위양성의 가능성은 존재하지만 세포변형현상을 기준으로 감염성 바이러스 오염을 판단하는 방법보다(RT)-PCR을 사용할 경우 검출률이 높아진다고 김교수는 보고하였으며 이러한 주장은 1996년 Reynolds 등에 의해서도 이미 보고된 바 있어 설득력을 갖는다. 따라서 이 연구로 인해 비록 수돗물바이러스 검출방법론의 획기적 전기가 마련된 것은 아니지만, 세계적인 대도시 서울의 수돗물에서 바이러스 검출을 국제학술지에 처음 보고했다는 점도 논문의 의미를 상승시킨 것으로 생각된다. 한편, 여기서 우리는 서울시와 환경부가 왜 미국환경청에서 공시한 ICR-TCVA를 바이러스 검출연구를 위한 표준공정시험법으로 고집하고 있는지를 짚어볼 필요가 있다. ICR-TCVA를 최종 정리한 책임연구자인 미국환경청의 Shay Fout 박사는 바이러스 검출을 위한 표준공정시험법이 충족해야 할 기본 요건으로 ① 바이러스 회수율, ② 표준편차가 생물산업

최소화된 정확도, 즉 신뢰도, 그리고 ③ 그 결과는 법률적 방어가 가능해야한다는 점을 들고 있다. 다시 말하면, 공식연구결과와 그 해석은 정책설정을 위한 기본 자료로서 뿐만 아니라 종종 법적 구속력과 연결되기 때문에 엄정한 정도관리와 함께 연구결과 분석에 대한 합리적 객관성이 매우 중요하다고 판단된다. 결국 당국과 김교수 사이의 의견 대립은, 연구결과에 근거한 학자의 문제제기를 수렴하는 데 있어서 표출된 당국의 미숙함과 또 이러한 공방의 과정 중에 생성된 상호간의 감정적 부담이 처음부터 얽힌 바 되었으며 '바이러스 오염 여부' 즉, 검출 민감도를 중심으로 주장을 펼친 김교수와 '바이러스 오염 부하' 즉, 연구결과로 도출되는 수치의 신뢰도를 중심으로 반박하는 당국 사이의 오해도 한 몫을 담당한 것으로 보인다. 적어도 과학적 측면에서는, 단순비교가 불가능한 정성적 가치와 정량적 가치를 상호 비교하며 논란의 대상이 되어 왔다는 느낌에 안타까움을 금할 수 없으며 현재 우리가 핵심으로 삼아야 할 쟁점은 서로의 연구결과에 대한 가치를 인정하고 수돗물 생산과 공급체계, 그리고 상수원이 포함된 환경관리의 최적화를 위해 어떤 대응을 필요로 하며 또 이를 어떻게 수행할 것인가의 여부이다.

오늘날 검출 민감도에 있어서 PCR의 능력은 분자생물학적 기법의 기본을 이해하는 사람이라면 누구도 이의를 제기하지 않을 것으로 본다. 따라서 위양성의 가능성이 있더라도 김교수가 정성적 판단을 근거로 논리를 전개할 경우 김교수의 의견은 참고 이상의 가치가 있음을 부정해서는 안 된다. 한편, 바이러스 오염부하에 대한 정량적 판단이 요구되고 이를 기준으로 법적 구속력을 갖는 공공정책을 설정해야 하는 경우에 있어서는 정성적 판단을 기반으로 한 단순한 extrapolation만으로는 무리가 따를 수밖에 없음도 참고되어야 한다. 일견, 김교수의 바이러스 농축과정은 ICR의 틀을 따르고는 있으나 PEG 8000의 사용을 비롯한 몇 가지 과정에서 ICR의 규정을 벗어나고 있음을 김교수는 논문에서 밝히고 있다. 한편 김교수의 '세포배양법'에서는 전체 농축시료(30 ml)의 50~90%(평균 85%)를 접종하도록 규정되어 있는 ICR-TCVA와는 달리 최종 농축액의 13.3%(5 plate×0.8 ml)만을 접종에 사용했다고 밝히고 있으며, 이 단계는 여타 화학 물질오염과는 달리 수계환경에서 불균등한 분포특성을 갖는 바이러스 오염의 정량적 판단을 하는데 매우 중요하다. 또한 20개의 배양세포주 플라스크로 시작하여 최대 70개의 세포 플라스크까지 사용하는 ICR-TCVA의 질차와는 달리 5개의 세포 플라스크를 계대배양, 최대 10개의 플라스크를 사용하고 실제 MPN을 계산하는 과정에서는 다시 ICR-TCVA의 "MPN software program"을 적용하는 경우, MPN의 산출수치는 동일하지만 그 수치에 대한 'confidence limit'에서는 큰 차이를 나타낼 수밖에 없다. MPN의 계산에서는 'upper and lower 95% confidence limit'이 동시에 산출되며 여기서의 'confidence limit'은 'upper

limit'과 'lower limit'의 범위에 따라, 프로그램을 통하여 계산된 수치의 신뢰도를 제시한다. 최적확률수를 의미하는 MPN에 대한 신뢰도는 곧 이 'confidence limit'에 의존한다는 뜻이다. 2000년 논문을 통해 밝힌 김교수의 바이러스 검출방법론은 공교롭게도 1996년 Reynolds 등이 학계에 보고한 'Integrated Cell Culture-PCR'방법과 매우 닮아 있다. 그러나, Reynolds 등과 2000년 ICC-PCR법 및 ICR-TCVA법의 비교연구를 수행하여 학계에 보고한 Margoline 박사 연구팀(Chapron et al.)은 ICC-PCR법의 검출 민감도만을 비교 검증하였을 뿐, MPN 산출에 의한 정량적 분석은 배제하고 있으며 이들 논문에서 적용한 '세포배양법'과 PCR에 의한 정량은 동일시료를 사용할 경우에도 'ICR-TCVA'의 정량분석결과와는 상당히 다른 신뢰도가 적용될 것으로 판단된다.

5. 맺는 말

모든 과학자는 본인이 설정한 연구목적에 따라 가장 합목적적이라고 판단되는 연구방법론을 고안하거나 선정한다. 무엇인가를 검출하는 방법론에 있어서 과학자들에게 가장 중요한 사항을 손꼽으려면 많은 경우 '민감도'를 제시하리라는 것은 당연하다. 생명과학을 하는 연구자들은 극미량의 특정 유전물질 검출하는 방법론으로 이제 고전이 되다시피 한 Southern 및 Northern hybridization의 어마어마한 힘을 기억하고 있다. 그러나 그 힘의 대부분은 1980년대 이후 PCR 기법에 자리를 내줄 수밖에 없었으며 금세기 PCR의 민감도를 능가할 만한 방법론은 아직 개발되지 않고 있다. 그러나 이로 인해 Southern 및 Northern hybridization이 사용 중단된 것은 아니며 이 방법의 유용성은 끊임없이 보완되어 각종 새로운 기법들과 함께 선택적으로 활용되고 있다. 국가에서 특정 사안에 대하여 과학적 조사연구사업을 수행하는 '목적'은 연구자의 과학적 욕구에만 국한될 수 없다는 특징을 갖는다. 국가에서 기획한 수돗물바이러스 연구는 우리 모두를 포함한 국민의 세 금으로 수행되는 것이며 이 연구의 결과는 향후 궁극적 국민 보건 향상을 위해 물 관리 정책을 조정하고 보완하는 데 기초 자료를 생산한다는 목적을 내재하고 있다. 바로 이 목적에 따라 주관기관에서는 최선의 방법론을 '선택'해야만 하며 이 방법론은 기획된 연구기간 동안 수시로 바뀌어서는 안 된다. 특정 연구를 수행하는 기간 중에도 많은 새로운 방법론들이 보다 나은 효용성을 표방하며 제시될 수 있으나 새로운 방법론을 수시로 바꿔 적용하게 될 때 데이터의 균질성은 보장받지 못할 것이며 결국 '공식 연구 사업'에 의한 연구결과의 핵심인 신뢰도는 애초부터 확보할 수 없게 되기 때문이다. 물론 '최선의 민감도'가 곧 '최선의 선택'인지는 연구를 수행하는 과학자들의 고유한 판단영역이다.

우리 나라의 수많은 과학자들이 그리 어렵지 않게 해낼 수

있는 이 연구를 우연히 맡게된 이유로 많은 질문을 접했다. 그 중 하나는 "김상중 교수의 검출방법이 '과학적'인가?" 하는 것이었다. 이미 짐작하겠지만 이 질문 자체가 '과학적'이 아니다. 한 과학자가 자신의 연구 목적에 따라 선택하고 적용한 방법론이 '비과학적'이기는 지극히 어렵다. 비록 그 연구 방법론에 약점이 있다 할 지라도 과학자는 지속적인 연구를 통해 이를 보완하고 연구논문의 학술발표를 통해 다른 학자들과의 학술적 교류를 시도하는 것이다. 그러나 연구자가 그 연구결과를 어떻게 이용하는지와 또한 그 연구결과를 접하는 사람들의 가감 없는 수용을 유도하는 것은 어쩌면 연구자체를 수행하는 것 보다 훨씬 중요할 지도 모른다. 지난 1997년 7월~1999년 12월 사이 1600억 원이 넘는 예산을 들여 전국의 3500여 지 표수를 대상으로 바이러스 오염을 조사한 미국 환경청은 인터넷에 다음과 같은 서문과 함께 그 결과를 공개하고 있다.

REMINDER: Data Purpose: The ICR data were collected as part of a national research project to support development of national drinking water standards. They should NOT be used to determine local water systems compliance with drinking water standards, nor should they be used to make personal judgements about health risks.

Results of Zero: A measurement of zero means that no Virus was found in the sample volume that was analyzed. Zero results do not indicate the absence of Virus in the source water because the method recovery is low and the amount of sample analyzed is small. In other words, Virus may be present in source water even if no virus are counted for the sample volume analyzed.

스포츠에는 '공식기록'과 '비공식기록'이 있다. 공식기록의 수립을 인증 받기 위해서는 그 기록을 생산할 당시에 요구되는 모든 정도관리 요건에 충족되어야만 한다. 그렇다고 해서 공식기록이 비공식기록을 무시하지 않으며 이와 반대로 비공식기록이 공식기록을 비방하지도 않는다. 때로 비공식 기록은 공식기록보다 나올 수 있으며 그 역도 존재한다. 공식기록과 비공식기록은 단순 비교를 통해 우위를 가늠하지 않지만 나름대로의 가치를 가지며 이를 서로 인정하여 보다 나은 기록 생산에 도전한다. 공식기록도 비공식기록도 모두 운동선수가 수립하며 공식기록이라고 해서 체육회장이 수립하는 것은 아니다. 국가가 기획한 연구를 수행하는 학자들은 개인의 독립적 연구를 수행하는 학자들 각자의 연구에 최선을 다해야하며 각각의 연구결과는 비교우위를 배제한 가치를 갖는다. 다만 과학자는 이 결과를 언급할 때 전문적 안목과 함께 개인의 취향을 최대한 자제해야 한다고 본다. 수돗물 바이러스 오염문제에 관련

된 수많은 물음 중에 우리는 과연 무엇에 대해 얼마나 대답해 줄 수 있는가? 우리 상수원수의 바이러스 부하는 얼마 만큼인가? 미국 환경청에서 제시하는 99.99%의 바이러스 제거능력을 국내 정수시설이 완벽하게 보장하더라도 10만개의 바이러스 입자가 원수에 존재할 때 10개의 바이러스 입자는 우리의 수도물에 나타날 수밖에 없다. 상수원수의 바이러스 부하는 어디에서 출발되며 또 어떻게 줄일 수 있는가? 대도시의 정수능력에 비해 수많은 중소규모 도시와 촌락은 매우 열악한 상태임은 누구나 알고 있는 사실이며 수많은 폐관정이 방치되어 있는 상태에서 과연 먹는 샘물과 약수는 바이러스 오염으로부터 안전한가? 수도물의 배급망은 토양이나 오수의 침투로부터 얼마만큼 자유로운가? 수도물 바이러스 오염으로 인한 위해도 어느 정도인가? 이 문제의 해결을 위해 관계당국, 학계전문가, 시민단체, 언론, 그리고 국민 개개인이 해야 할 바는 무엇인가? 어느 누구도 이 질문들에 혼자서는 대답할 수 없으며 객관적이고 합리적인 총의가 절실한 때이다. 할 일이 정말 많다. 사람이 살아가는 생활환경의 모든 영역에는 사람의 건강을 위협하는 바이러스가 존재한다. 이 사실은 천년 전이나 천년 후에나 변함없는 사실이다. 우리가 마시는 물에 감염성 바이러스가 존재하는 것은 정부기관의 관료이든 민간인이든 할 것 없이 누구도 바라지 않는다. 이 문제에 관심을 가질 수 있을 만큼 우리의 생활 수준과 기술력이 발전되었다면 그 만큼 이 문제를 다룰 수 있는 의식도 성장해야 한다. 국가가 국민을 위한다는 대명제 하에 특정 목적을 위한 정책을 세우는 일은 전 국민의 세금을 들여 장기간 전 국민에게 직·간접으로 영향을 끼치게 될 사안을 결정하는 일이라고 본다. 수도물바이러스를 포함한 많은 환경문제들에서는 과학적 판단이 절대적이다. 과학적 정책 설정에 과학적 자료의 수집과 분석과정이 결여되어서는 안 된다. 지금 우리는 합리적이고 과학적 판단을 내리는데 요구되는 자료가 절대적으로 부족하다. 공식자료는 공식자료대로 비공식자료는 비공식 자료대로 열심히 준비되어야 할 때임을 우리 모두 잘 알고 있지 않은가?

참고 문헌

1. 김상중(1999) 바이러스에 의한 수도물 오염현황 및 대책. <수도물 신뢰제고를 위한 정책토론회>, 환경부
2. 신동천(1999) 먹는물의 건강 위해성 평가 및 제고관리 방안. <수도물 신뢰제고를 위한 정책토론회>, 환경부
3. 정용석(1999) 수인성 바이러스의 수계환경내 분포실태 및 검색방법. 수자원환경. 제121호
4. 정용석(1999) 한국 수계에서의 바이러스 검출연구 현황과 관리방안. 99 한국환경독성학회 춘계학술대회
5. 정용석(2000) 먹는 물과 환경바이러스. “제8회 세계 물의 날 기념세미나: 21세기 먹는 물 관리방향” pp 79-107.
6. 정현미(1998) 수도물의 엔테로바이러스분석의 문제점과 대처방안. 98. 수자원환경 테마 세미나 “우리나라의 수처리 문제와 대응전략”
7. 정현미(1999) 바이러스 수질분석과 정도관리-요건과 전망. “먹는 물 수원에서 Virus 검출과 정도관리” 국제 심포지엄
8. APHA. AWWA. WPCF.(1998) Standard Method For the Examination of Water and Wastewater, 19th edition
9. Bernard, L. C., Martin, S. H., Joseph, L. M., Thomas P. M. and Bernard, R.(1990) Picornaviridae in Virology Vol. I, Raven Press, New York.
10. Brock, T. D., D. W. Smith, and M. T. Madigan.(1994) Biology of Microorganisms. 7th Edition. Prentice-Hall, London.
11. Burrelson, F. G., Chambers, T. M., Wiedbrauk, D. L.(1992) Virology: A Laboratory Manual, Academic Press, Inc., San Diego, California, pp.74-84.
12. Chapron C. D. *et al.*(2000) Detection of astroviruses, enteroviruses, and adenovirus types 40 and 41 in surface waters collected and evaluated by the information collection rule and an integrated cell culture-nested PCR procedure. *Appl. Environ. Microbiol.* **66**: 2520-2525.
13. Cho H. B. *et al.*(2000) Detection of adenoviruses and enteroviruses in tap water and river water by reverse transcription multiplex PCR. *Can. J. Microbiol.* **46**: 417-424.
14. Coin, L.(1966) Modern microbiology and virological aspects of water pollution, pp.1-10. In Advances in Water Pollution Research(edited by Jaag, O.), Pergamon Press, London
15. Cooper, J. I.(1995) Viruses in aquatic environments, pp.130-139. In Viruses and the Environment, 2nd edit. Chapman & Hall, London
16. EPA(1988) Comparative Health Effects Assessment of Drinking Water Treatment Technology, Report to Congress
17. EPA(1996) National Primary Drinking Water Regulations: Monitoring Requirements for Public Drinking Water Supplies: Final Rule. 24353-24388
18. EPA(1998) 814-B-95-001 Virus monitoring protocol for the Information Collection requirements Rule.
19. EPA(1998) 814-B-95-001 Information Collection requirements Rule-Protozoa and enteric virus sample collection procedure.
20. EPA(1996) Microbial Laboratory Manual, EPA/600-R-95-178 ICR
21. Geldenhuys, J. C. and Pretourius, P. D.(1989) The occurrence of enteric viruses in polluted water, correlation to indicator organisms and factors influencing their numbers. *Water Science and Technology*, **21**: 105-109.
22. Geldreich, E. E.(1991) Opportunistic Organisms and the Water Supply Connection. Proceedings from the American Water Works Association, Water Quality Technology Conference, November 10-14, 1991, Orlando,

- Florida.
23. Gerba, C. P. and Rose, J. B.(1990) Viruses in source and drinking water, pp.385-401, In *Drinking Water Microbiology*(edition by McFeters, G.A.)
 24. Grist, N. R. and Bell, E. J.(1975) The epidemiology of enteroviruses. *Scott. Med. J.*, **20**: 27-31.
 25. Hurst, C. J. *et al.*(1990) Persistence of indigenous viruses through the processing regimen at an operating water treatment plant. In *Proceedings of the XVII Water Quality Technology Conference*, Philadelphia, 12-16 November 1989. Denver, CO, American Water Works Association, pp.279-286.
 26. Hurst, C. J.(1991) Presence of enteric viruses in freshwater and their removal by the conventional drinking water treatment process. *Bull WHO*, **69**(1): 113-119.
 27. Hurst, C. J. *et al.*(1989) Detection of viruses in water. *Journal of the American Water Works Association*. **81**: 71-80.
 28. Jeong, Y. S. *et al.*(2000) Water-borne viruses in drinking water in Korea: survey 1999 for enteric virus contamination in treated water and its source water. International Meeting 2000, *The Microbiological Society of Korea*. Abstract B21.
 29. Keswick, B. H. *et al.*(1984) Detection of enteric viruses in treated drinking water. *Appl. Environ. Microbiol.* **47**: 1290-1294.
 30. Lee, S. H. and S. J. Kim.(1997) The development of detection method for the monitoring viral contamination of aquatic environment. 제37회 한국미생물학회 춘계학술대회 초록집. ME16.
 31. Lee, S. H. and S. J. Kim.(1997) The usefulness of PCR in determination of viral contamination leve in aquatic environment. 한국미생물학회 추계학술대회 초록집. B305.
 32. Leparc, I., Aymard, M., Fuchs, F.(1994) Acute, chronic and persistent enterovirus and poliovirus infections: detection of viral genome by seminested PCR amplification in culture-negative samples. *Mol. Cell Probes* **8**: 487-495.
 33. Lipson, S. M. *et al.*(1995) Cell culture-PCR technique for detection of infectious cytomegalovirus in peripheral blood. *J. Clin. Microbiol.* **33**: 1411-1413.
 34. Melnick J.L., ed.(1984) Enteric viruses in water: Monographs in Virology, Vol. 15. Basel. Switzerland: Karger.
 35. Melnick J.L., Gerba, C.P., Wallis, C.(1978) Viruses in water. *Bull WHO* **56**: 499-508.
 36. Moore, M.(1982) From the Centers for Disease Control: Enteroviral disease in the United States, 1970-1979. *J. Infect Dis.*, **146**: 103-108.
 37. N.P. Moyer.(1995) Microbial Risks from Sources Other Than Water. WQTC presentation.
 38. Oberste, M. S., Maher, K., Pallansch, M. A.(1999) Specific detection of echoviruses 22 and 23 in cell culture supernatants by RT-PCR. *J. Med. Virol.* **58**: 178-181.
 39. Payment, P. *et al.*(1985) Elimination of viruses and indicator bacteria at each step of treatment during preparation of drinking water at seven water treatment plants. *Appl. Environ. Microbiol.*, **49**: 1418-1428.
 40. Puig, M. *et al.*(1994) Detection of adenoviruses and enteroviruses in polluted waters by nested PCR amplification. *Appl. Environ. Microbiol.* **60**: 2963-2970.
 41. Reynolds, K. A., Gerba, C. P., Pepper, I. L.(1996) Detection of infectious enteroviruses by an integrated cell culture-PCR procedure. *Appl. Environ. Microbiol.* **62**: 1424-1427.
 42. Simkova, A. and Cervenka, J.(1981) Coliphages as ecological indicators of enteroviruses in various water systems. *Bull WHO* **59**: 611-618.
 43. Straub, T. M., Pepper, I. L., Gerba, C. P.(1995) Comparison of PCR and cell culture for detection of enteroviruses in sludge-amended field soils and determination of their transport. *Appl. Environ. Microbiol.* **61**: 2066-2068.