

# 강변여과(Riverbank Filtration)

❖ 최근 선진국들을 중심으로 소독부산물 전구물질과 원생동물 제어를 위해 도입·운영되고 있는 강변여과에 대해 알아보려 합니다. 이번호부터 게재되는 논문은 미국수도협회(AWWA)의 협회지에 2003년 10월 게재된 (Riverbank Filtration – fate of DBP precursors and selected microorganism)를 번역한 것입니다.

2004년 봄호 \_\_ 1. 소독 2. 배경 3. 현장설명 4. 재료와 방법  
-----  
2004년 여름호 \_\_ 5. 결과 6. 논의

## 1. 소독

미국 중서부에 있는 3개 음용수 시설에서 RBF(Riverbank Filtration, 강변여과) 이후 TOC(Total Organic Carbon, 총 유기탄소), DOC(Dissolved Organic Carbon, 용존 유기탄소) 및 소독부산물 전구물질이 현저히 감소한 것으로 관측됐다. 이 세 곳의 인근 하천에서의 TOC와 DOC 감소치는 35~67%였다. Trihalomethane Formation Potential과 Haloacetic Acid Formation Potential 농도가 50~80% 감소했다.

Haloacetonitriles, Haloketones, Chloral Hydrate, 및 Chloropicrin 전구물질 감소치는 RBF 이후 30~100%였다. Clostridiumwere 농도 감소치는 3로그(log)가 넘는 것으로 관측됐다. 강과 우물의 로그 감소치는 E. coli C Bacteriophage의 경우 >2.6~>3.3이고 E. Coli F-amp Bacteriophage의 경우는 >1.9~>2.3이었으나, 강과 우물물에서의 지아디아와 크립토스포리디움의 제한된 출현은 이러한 미생물의 제거에 대한 확고한 결론 수립을 저해했다.

### (1) DBP 전구물질과 선택된 미생물의 운명

RBF(Riverbank Filtration, 강변여과)는 지표수가 식수원으로서 취수되어 활용되기 전에 지하 수로를 거치는 과정이다. 여과와 대수층 침전물을 통과하는 동안 지표수는 낮은 수질을 현저히 향상시킬 수 있는 여과, 희석, 수착 및 생분해와 같은 물리적, 화학적 및 생물학적 과정을 거친다(Kuehn & Mueller, 2000, Kivimaki et al, 1998, Stuyfzand, 1998).



그림 1) REF(Riverbank Filtration)에 대한 관심이 미국 내에서 증가하는 이유는 소독부산물 전구물질과 지아디아와 크립토스포리디움과 같은 미생물 오염물질을 감소시킬 수 있는 능력 때문이다. 본 연구의 일환으로 2년에 걸쳐 샘플을 추출한 Wabash강의 상태를 측정하고 있는 계측기를 보여주고 있다.

RBF는 유럽에서 많이 사용되고 있으며, 일부 RBF 시스템은 100년 이상 사용되고 있다(Kuehn & Mueller, 2000; Doussan et al, 1997; Wilderer et al, 1985, Piet & Zoeteman, 1985, Sontheimer, 1980; Kussmaul, 1979). 유럽의 경우 유기물 제거(TOC : Total Organic Carbon, 화학적 산소 요구량, 생분해성 유기물 등에 의해 측정됨), 고형 부유물 및 악성 화합물 제거, 대장균

개체 수 감소 및 화학적 오염물의 충격 부하 감소를 비롯한 RBF와 관련된 많은 수질 개선사례를 경험해 왔다(Doussan et al, 1997, Juttner, 1995, Cosovic et al, 1996, Miettinen et al, 1994).

RBF 사용에 대한 관심이 미국 내에서 증가하는 이유는 소독부산물(Disinfections By-product, DBP) 전구물질과 원생동물 병원체, Giardia Lambli와 Cryptosporidium Parvum와 같은 미생물 오염물질을 감소할 수 있는 능력 때문이다(Ray et al, 2002a, Tufenkji et al, 2002, Weiss et al, 2002, Bouwer et al, 1999, Verstraeten et al, 1999, Wang et al, 1999).

유럽과 미국의 RBF 사용 경험은 최근 두 저서의 주제이자(Ray et al, 2003; Ray, 2002) Journal of Hydrology의 주요 쟁점(Dillon et al, 2002, Heberer, 2002, Hiscock & Grischek, 2002, Ray et al, 2002b, Schubert, 2002, Sheets et al, 2002, Verstraeten et al, 2002, Wett et al, 2002, Worch et al, 2002)이었다. RBF는, 식수 시설에 있어 적절한 미생물 오염물 방지와 유해성 DBP의 최소화라는, 때때로 상충되는 요구사이의 균형을 조절할 수 있도록 해주는 공정으로서 확실한 가능성을 보여준다.

## 2. 배경

### (1) DBPs

먹는 물의 천연 유기물(Natural Organic Matter, NOM)은 소독에 사용되는 염소와 작용하여 Trihalomethane(THM)와 Haloacetic Acid(HAA)와 같은 할로젠화 DPB를 형성하고 이의 대다수는 인체 발암물질로 의심을 받거나 발암물질로 알려져 있다(Singer, 1999).

브로마이드(Bromide, Br)가 없는 경우 염소는 NOM과 작용하여 염소화 DBP만을 형성한다. Br 역시 존재하는 경우에는 염소화와 동시에 브롬화 및 염소화 DBP종(Species)이 형성된다. 브롬화 및 염소화 종의 상대적 양은 주로 용해 유기 탄소(DOC, Dissolved Organic Carbon)에 대한 Br 비율과 염소에 대한 Br 비율뿐만 아니라 염소화 조건에 따라 결정된다(염소 농도, 반응 시간 및 pH 포함, Shukairy et al, 1994).

DBP 형성 억제를 위해 가능한 접근법에는 ① NOM과 쉽게 반응을 일으키지 않는 자외선 투사 또는 모노클로라민(Monochloramines), ② 입상활성탄(GAC, Granular Activated Carbon) 흡착(Absorption) 또는 분리(Stripping)와 같은 공정을 통한 정수(Finished Waters)에서 DBS 제거 및, ③ DBP 형성을

방지하기 위한 NOM 전구물질을 제거를 통한 보다 나은 원수 수질 제어 등이 있다. DBF 제어를 위한 RBF 가치는 이 마지막 이점, 즉 지하수로의 경유를 통한 NOM 제거에 있다. 강변 취수장(Riverbank Collection Wells) 역시 부분적으로 다른 수원에서 지하수를 추출할 수 있다. 지역 지하수를 이용한 이러한 희석 방법은 전체 수질에 중요한 인자이다. 하지만 본 논문의 맥락상 볼 때 이러한 개선 유형은 RBF 공정의 범위 밖으로 간주한다.

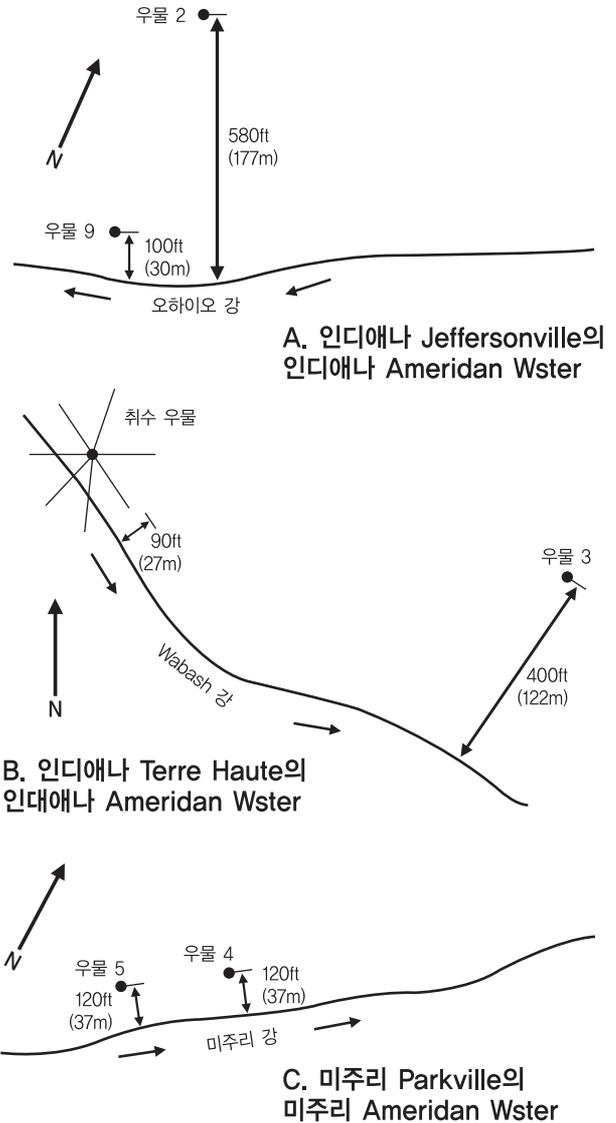


그림 2) 3개 연구 부지의 우물 위치

### (2) 미생물 오염물질

사람이 식수원을 통해 Giardia와 Cryptosporidium와 같은 병원성 원생동물에 노출된 사례가 최근 문헌에서 자세히 다루어지고 있고(Rose et al, 2000, Craun et al, 1998, Solo-Gabriele &



그림 3) 본 연구를 할 당시 인디애나 Terre Haute에 있는 인디애나 미국 정수장의 수원지에는 강에서 400~2,500피트 거리에 위치한 5개 2.1mgd 수직 취수정을 포함시켰다. 이 취수정들은 막힘(Clogging)을 방지하기 위해 펌프 속도를 250에서 350gpm으로 제한했다.

Neumeister, 1996) 일부 병원균이 재래식 처리시설과 소독 시스템에서 살아남을 수 있는 가능성이 많은 연구의 주제로 다루어져 왔다(LeChevallier et al, 1992, Robertson et al, 1992, LeChevallier et al, 1991, Rose et al, 1991). 보고된 다수의 수인성 질병 발발은 기존 연방 및 지방 규정을 준수하여 운용되었던 수처리시스템에 기인하고 있다(Solo-gabriele & Neumeister, 1996).

식수의 병원균 제어는 수원지의 병원성 미생물 제거를 위한 적절한 소독을 확실하게 하는 것과 유해한 DBP 생성을 최소화하는 일 사이의 적절한 균형을 이루는 것이다. RBF는 DBP 전구물질의 농축을 줄이는 동시에 미생물 오염물질에 대한 추가적인 장벽을 제공해주는 역할을 할 수 있다는 점에서 많은 희망을 제시해왔다(Bouwer et al, 1999).

### (3) 연구 목표

이 연구의 목표는 일부 RBF 운영 시스템에서 DBP 전구물질과 병원균 측정치를 줄일 수 있는 정도를 평가하고 그 결과치를 단순 재래식 처리시설에서 얻어진 수치와 비교하고자 하는 것이다.

미국 중서부 오하이오강, 와바시강 및 미주리강을 따라 분포해 있는 3개 RBF 시스템에 대해 1년 이상 DBP 전구물질과 선정된 미생물을 측정했다. 급수 시스템은 본 연구의 파트너인 American Water의 자회사들에서 보유, 운영하고 있으며, 대수층 내부의 이동 거리와 상주 시간을 비롯한 일련의 특징들을 제공한다.

본 연구는 강물과 Bank-filtered Water에서의 TOC, DOC를 비롯한 수질 매개변수, 여러 무기질 매개변수(주요 양이온과 음이온, 총 용해 고형물(Total Dissolved Solids, TDS), 온도 및 PH 포함) 및 DBP Formation Potential (FP)을 관찰하였다. 그리고 나서 이 결과값들을 Bench-scale의 강물 모의 처리시설에서 얻은 값과 비교했다. 본 연구 결과는 두 논문으로 요약됐다. 본 논문은 강물 수원지와 RBF 비교를 중심으로 살펴본다. 또 하나의 논문(Weiss et al, 2003a)은 강물을 이용한 Laboratory-scale의 재래식 처리장과 RBF를 비교한다.

## 3. 현장 설명

### (1) 인디애나 Jeffersonville의 Indiana American Water. Jeffersonville

인디애나 정수장은 켄터키 루이지빌 바로 북쪽에 위치해 있다. 본 연구를 진행하던 당시 오하이오 강 부근의 두 개 우물에서 Jeffersonville에 식수원을 제공했다. Babb 수원지를 본 연구의 대상으로 정했다. 본 연구는 우물 2와 9번에서 샘플을 채취했다.

우물 2는 강 길이가 580피트(177미터)이며 우물 스크린까지는 수심이 66피트(20미터), 길이는 25피트(8미터)이다. 우물 9는 강 길이가 100피트(30미터), 우물 스크린까지 수심이 45피트(14미터), 길이는 50피트(15미터)이다(표 1과 그림 2, 부분 A).

Jeffersonville의 지하수 흐름 분석은 사전에, Eagon & Associates Inc.(오하이오 워딩턴)에서 미국 지질학회 지하수 흐름 및 입자 추적 프로그램(MODPATH ; Pollock, 1994)을 사용

위치		우물 스크린까지의 수심 ft(m)	우물 스크린 길이 ft(m)	예상 이동 시간 (일)	우물 용량 gpm(m <sup>3</sup> /d)
인디애나 Jeffersonville	우물 2	66 (20)	25 (8)	13~19	1,000~1,400 (5,450~7,630)
	우물 9	45 (14)	50 (15)	3~5	
인디애나 Terre Haute	취수정	Arms까지 수심 80 (24)	스크린 측면의 1,600 (480)	14~60	8,350 (45,500)
	우물 3	78 (24)	45 (14)	NA*	690 (3,760)
미주리 Parkville	우물 4	57 (17)	20 (6)	NA	1,150 (6,270)
	우물 5	59 (18)	30 (9)	NA	1,400 (7,650)

\* NA 해당 없음

표 1) 3개 연구 부지 우물의 특성

해서 실시했다. 우물까지의 이동 시간과 강물 유속을 분석한 결과 모델 수원지(Babb 수원지와 인근 부지의 예정된 수원지와 함께 총 11개 우물 포함)의 총 방수량의 96%는 오하이오 강으로부터 유도하여 여과시킨 물이었다.

우물 2까지 가는 데는 13에서 19일이 걸리고 우물9까지 가는 데는 3일에서 5일이 걸리는 것으로 추정되었다. 이 시간은 펌프 속도와 공극률 차이로 어느 정도 차이를 보이고 각 우물을 분석해 본 결과 펌프 속도는 1.5와 2.0mgd(5.7과 7.6ML/d)이고 대수층 공극률은 20, 25 그리고 30%로서, 이에 의하여 오하이오 강에서 특정 거리에 있는 우물까지의 이동 시간 차이가 나타난다.

본 분석은 모두 11개우물의 총 펌프 속도를 19mgd(72ML/d)로 가정하였다.

일반적으로 지표 밑 물질의 첫 20피트는 진흙과 모래 또는 자갈 혼합이 되는 갈색 진흙 성분이다. 이 진흙 층 아래는 약 100피트(30미터)의 잔모래와 중간 모래가 섞인 거친 자갈층이 있다. Babb 우물의 추정 안전 수율과 오하이오강의 용수 능력은 (최대 원수 펌프 능력 기준) 각각 5.2와 7.2mgd(19.7과 27.3ML/d)이다. 현재 시의 음용수로 사용하기 위해 우물물은 화학 처리를 하여 철과 망간을 제거하고 급수를 하기 전에 염소 처리를 한다.

### (2) 인디애나주, Terre Haute American Water, Inc.

본 연구를 할 당시 Terre Haute에 있는 인디애나 American Water의 수원지는 Wabash 강둑에 위치한 12mgd(45ML/d) 가로 취수정 1개와 강에서 400~2,500피트 (122~762미터) 떨어져 있는 2.1mgd(7.9ML/d) 세로 우물이 5개 있었다. 막힘 현상을 방지하기 위해 세로 우물 펌프 속도는 250~350gpm (1,362~1,907 m<sup>3</sup>/d)로 제한됐다. 5개 세로 우물의 총 가용 펌프 능력은

7.2mgd(27.3ML/d)였다. 본 연구를 위해 샘플을 채취한 우물은 가로 취수정과 세로 우물 3이었다(표 1과 그림 2, 부분 B). 취수정은 강에서 90피트(27미터) 거리에 있고 중심에서 강 하류 수심 80피트(24미터)까지 가로 Arms가 설치되어 있었다. 우물 3은 강에서 400피트(122미터) 거리에 있고 우물 스크린은 지하 78피트(24미터)와 123피트(38미터)까지 뻗어 있다.

와바시(Wabash) 강과 우물들 사이의 대수층은 중간 및 가는 모래가 주 성분이고 그 아래는 더 굵은 모래와 자갈 층이며 지하에서 약 50~60피트(15~18미터)에 있다. 취수 후, 현재 시에서 사용하는 용수를 위한 처리 방법은 철과 망간 제거를 위한 이중 매개체 압력 여과(Dual-media Pressure Filtration)와 공장 배출수의 Chloramination이 주를 이룬다.

### (3) Missouri American Water at Parkville, Mo.

Missouri American Water는 미주리 강을 따라 캔자스시로부터 이 강을 가로지른다.

연구 당시 4개의 세로 우물이 미주리 강 부근에 위치해 있고 용수 능력은 500~2,100gpm(2,750~11,443m<sup>3</sup>/d)이고 평균 종합 펌프 속도는 1.7 mgd(6.4 ML/d)였다. 본 연구를 위해 샘플을 채취한 우물은 4호와 5호였다(표 1과 그림 2, 부분 C). 우물 4호(1,150gpm [6,270m<sup>3</sup>/d])는 강에서 120피트(37미터) 거리에 위치해있고 스크린은 지하에서 57과 77피트 사이(17과 27미터 중간)에 위치해 있다.

우물 5호(1,400gpm [7,630 m<sup>3</sup>/d])는 강에서 120피트(37미터) 거리에 위치해 있고 스크린은 지하 59와 89피트 (18과 27미터) 중간에 있다. 파크스빌 부지에 관한 강에서의 이동 시간이나 여과 비율에 대한 분석은 이용할 수 없었다.

파크스빌의 대수층은 주로 단단한 혈암과 석회암을 덮고 있는 진흙과 슬릿이 층층으로 혼합된 미세한 것부터 굵은 모래, 자갈 및 암반 퇴적물(Boulder Deposit)로 되어 있다. 현재 시정부 수처리 작업에서 우물의 수원은 폭기(Aeration), 사전염소처리(Prechlorination), 부분 석회 연화, 방부 첨가제, 여과 및 사후염소처리(Postchlorination)를 이용하여 급배수전에 처리된다. 공장 배출수의 유리염소 잔여물이 낮게 유지되고 있는 바, 공장 배출수의 평균 총 염소량은 1.41.5mg/L이다.

#### 4. 재료와 방법

Jeffersonville과 Terre Haute의 강물과 bank-filtered water의 샘플은 2년간 채취되었다(Jeffersonville과 Terre Haute는 19회 샘플링, 파크빌은 18회 샘플링을 함). 1998년 10월부터 1999년 6월까지 월 2회씩, 1999년 7월부터 2000년 9월까지 월 1회씩 샘플을 채취했다.

강물 샘플의 경우 우물 부근 강 지역은 걸어서 가거나 배를 이용했고 가솔린 동력 펌프를 사용해서 샘플을 채취했다. 모든 우물마다 샘플 물을 끌어올릴 수 있는 배출 밸브가 있었다.



그림 4) 본 연구에서 조사한 우물은 샘플을 제공한 강에서 90~2,500피트 거리에 있었다. 모든 우물에는 샘플 물을 채취할 수 있는 배출 밸브가 설치되어 있었다.

TOC 및 DOC 분석과 염소처리 시험용 샘플은 10리터 접이식 플라스틱 병에 채취한 것을 얼음 팩으로 싸서 메릴랜드 볼티모어에 있는 존스 홉킨스 대학교 연구소로 밤사이 보내졌다.

기생충 분석을 위해 USEPA (Environmental Protection Agency) ICR (Information Collection Rule) 매뉴얼의 권장사항에 따라 실로 감은 폴리프로필렌 카트리지(공칭 구경 1-m)를 사용해서 10리터의 강물과 100리터의 우물물을 여과시켰다(Filterite Co., Timonium, USEPA, 1996). 연구소 미생물 분석을 위한 우물물과 강물 샘플은 얼음에 싸서 밤사이 일리노이주 벨르빌에 있는 미국 수질관리 연구소(American Water Quality Control and Research Laboratory)로 보내졌다.

#### (1) TOC, DOC 및 무기를 매개변수

TOC 측정에는 Standard Methods(1998)에 나온 설명과 같이 자외선 과황산 산화 방법(Ultraviolet-persulfate Oxidation Method) 5310을 기초로 한 상용 TOC 분석기(Tekmar-Dorhmann Phoenix 8000, Mason, Ohio)와 비 분산 적외선 탐지기를 사용했다. DOC는 샘플을 0.45-μm 여과막 필터지를 통과시켜 TOC 분석기에서 여과물질을 측정했다. 주요 양이온과 음이온 분석은 USEPA Method 200.7, 200.8 및 300-IC에 따라 실시했다(USEPA, 1994; USEPA, 1993).

#### (2) DBP 형성 시험

DBPFP 시험은 THMFP용 Method 5710B를 기초로 했다(Standard Methods, 1998). TOC 농도의 5배가 되는 염소로 샘플 Spiking을 함으로써 각 샘플의 2일 염소 요구량(D)를 측정했다. D는 최초 염소 농도와 2일 후 샘플의 잔량 염소 농도의 차이 값으로 계산됐다. 2일 염소 요구량 (D, D+3 및 D+6 mg/L)을 기준으로 3개 염소 수치를 이용하여 FP 시험을 실시했다. 7일 동안 배양기 후에 DBP 분석을 위해 유리 염소 잔량 농도가 2와 5mg/L의 사이인 샘플을 선정했다.

인산염 버퍼를 사용하여 pH7.0에서 시험을 실시했다. 염소 농도 측정은 Method 4500-CI G의 설명과 같이 N,N-Diethylphenylene-1,4 Diamine Method를 기초로 한 색도계 시험 키트4를 이용했다(Standard Methods, 1998). 4THM, 6HAA, 4Haloacetonitriles(HAN), 2Haloketones(HK), Chloral Hydrate(CH) 및 클로로피크린(Chloropicrin, CP)에 대한 샘플 분석을 했다. THM과 HAA 분석은 USEPA Method

502.2(USEPA, 1992)와 Method 6251B(Standard Methods,1998)를 각각 사용했다. HAN, HK, CH 및 CP 분석은 USEPA Method 551을 사용했다(USEPA, 1992).

THM 염소화 및 브롬화 4종  $\text{CHCl}_3$ (Chloroform),  $\text{CHCl}_2\text{Br}$ (Bromodichloromethane),  $\text{CHClBr}_2$ (Dibromochloromethane) 및  $\text{CHBr}_3$ (Bromoform)에 대한 THM 결과를 얻었고, 이들의 합을 THM4라고 나타낸다.

HAA 6종 Monochloro-, Dichloro, Trichloro-, Monobromo-, Dibromo, and Bromochloroacetic Acid (각각  $\text{CH}_2\text{ClCOOH}$ ,  $\text{CHCl}_2\text{COOH}$ ,  $\text{CCl}_3\text{COOH}$ ,  $\text{CH}_2\text{BrCOOH}$ ,  $\text{CHBr}_2\text{COOH}$  및  $\text{CHClBrCOOH}$ )에 대한 HAA 값이 도출되었고 이 합을 HAA6로 나타낸다. HAN4와 HK2는 각 HAN 중(Trichloroacetonitrile, 1,1-Dichloroacetonitrile, Bromochloroacetonitrile 및 Dibromoacetonitrile)과 HK 중(1,1-Dichloro-propanone과 1,1,1-Trichloropropanone)의 합을 각각 나타낸 것이다.

### (3) 미생물 분석

여러 강물과 Bank-filtered Water 샘플에서 몇 가지 미생물 분석을 했다. 월 3회씩 (샘플링 총 7회) Clostridium, 2 Bacteriophages, Giardia, 및 Cryptosporidium의 수효를 파악하였다.

Clostridium과 Bacteriophages 분석은 Belleville 연구소에서 개발한 다음 절차에 따라 이루어졌다. Clostridium Perfringens 포자는 여과막(Membrane Filtration) 기법을 사용해서 이중 시험에서 수효를 파악하였다(Armon & Payment, 1987). 첫 200 mL 물은 15분간 60°C에서 열처리를 했다. 부피와 희석 정도가 다른 샘플을 0.45- $\mu\text{m}$  여과막 필터를 통과시켰다.

그런 다음 필터를 mCP 세포 배양 접시에 놓았다. 이 접시는 24 시간 동안 44.5°C에서 배양했다. 24시간 후에 담황색 C.

Perfringens이 모여든 접시에 농축 수산화암모늄 증기를 쏘였다. 핑크빛에서 자홍색으로 변한 군체를 C. Perfringens로 가정하여 산정하였다.

세균바이러스(Bacteriophage) 분석은 이중 세포 배양 증 기법을 사용하여 외동 여과막 여과법 (Vortex Membrane Filtration)을 사용했다(Sobsey et al, 1995). 사용된 2개의 미생물 숙주는 체강 살균 숙주(Somatic Phage Host) E. coli C와 수컷 숙주 E. Coli F-amp였다. E. Coli C는 밤사이 37°C에서 진동 상태로 Tryptone Broth에 배양시켰다.

E. Coli F-amp는 리터당 스트렙토마이신(Streptomycin)과 암피실린(Ampicillin)이 각각 0.015g 들어 있는 Tryptic soy broth에서 배양시켰다. 세균바이러스 측정은 이중 100-mL 샘플에서 이루어졌으며, 플라그가 생긴 개체 수로서 됐다. 양성 및 음성 제어를 사용하여 분석했다(Sobsey et al, 1995).

Giardia와 Cryptosporidium 분석은 Immunofluorescence 분석을 토대로 한 USEPA ICR(Information Collection Rule) 방법을 사용했다(USEPA, 1996). method 9221 B (Standard Total Coliform 발효 기법)와 Method 9221 F(Escherichia Coli 절차 [예정])를 사용하여 Terre Haute 지역에서 15회 차례 샘플링을 하는 동안 전체 Coliforms과 E. Coli가 관찰되었다(Standard Methods, 1998). 

(2004년 여름호에 계속)

### \* 저자 소개

「W. Joshua Weiss」는 존스 홉킨스 대학교 지리 환경공학과 박사과정 후보이다(3400 N. Charles St., Baltimore, MD 21218, e-mail jweiss@jhu.edu). 그는 애틀랜타 조지아기술연구소에서 학사 학위를 받았고 존스 홉킨스에서 석

사 학위를 획득했다. 2000년 Chesapeake Section AWWA 학생 논문상을 수상한 Weiss는 지난 5년 동안 강변여과의 수질 이점에 대해 연구해왔다. [본 논문에 대한 의견이 있으면 journal@awwa.org로 연락 바랍니다.]