

<총 설>

## 수계환경에서 분변성 오염의 지표로 사용되는 미생물들

이 건 형

군산대학교 자연과학대학 과학기술학부

### Indicator Microorganisms Used as Fecal Contamination in Aquatic Environments

Geon-Hyoung Lee

Department of Biology, College of Natural Sciences, Kunsan National University, 573-701, Korea

**Abstract** - The direct detection of intestinal pathogens and viruses often requires costly, tedious, and time-consuming procedures. These requirements developed a test to show that the water was contaminated with sewage-borne pathogens by assessing the hygienic quality of water based on indicator microorganisms whose presence indicates that pathogenic microorganisms may also be present. Various groups of microorganisms have been suggested and used as indicator microorganisms. Proposed and commonly used microbial indicators are total coliforms, fecal coliforms, fecal streptococci, *Clostridium perfringens*, heterotrophic plate count, bacteriophage, and so on. Unfortunately, most, if not all, of these indicators are not ideal because of the sensitivity and resistance to environment stresses and disinfection. However, the development of gene probes and PCR technology may give hope for the discovery of rapid and simple methods for detecting small number of fecal pathogens in various environments.

**Key words** : indicator microorganisms, sewage-borne pathogens, fecal coliforms, bacteriophage

### 서 론

장내병원성 세균의 존재를 조사하기 위한 환경시료의 일상적인 검사는 종종 지루하고 어려우며 시간을 요하는 작업이다. 따라서, 먼저 어떤 지표미생물(indicator microorganisms)의 존재를 관찰하여 그 미생물이 존재하면 병원성 세균도 존재할 수 있다는 것을 관례적으로 검사 시행하여 왔다. 분변성 오염(fecal pollution)을 평가하는 방법이 19세기말에 개발되었을 때, 지표생물

(indicator organisms)의 개념은 어떤 비병원성 세균이 모든 온혈동물의 대변에서 출현한다는 사실에 의존하게 되었다. 1914년에 미국 공중위생국(U.S.P.H.S)에서 대장균군(coliform bacteria)을 식수의 분변성 오염 지표미생물로 채택하였고(Gerba 1987), 그 후, 여러 나라에서 대장균군과 여러 다른 미생물을 분변성 오염의 발생과 하수처리 효율, 배수시설에서의 물의 오염을 판단하는데 사용하였다(Olivieri 1983). 이러한 세균들은 쉽게 분리될 수 있고 간편한 미생물학적인 방법으로 계수될 수 있다. 물에서 이러한 미생물을 검출하는 것은 분변성 오염이 발생한 것을 의미하며 장내 병원균도 역시 존재한다는 것을 의미한다. 예를 들어, 모든 온혈동물에서 발견

\* Corresponding author: Geon-Hyoung Lee, Tel. 063-469-4584, E-mail: ghlee@kunsan.ac.kr

표 1. 이상적인 지표생물의 조건

- 지표세균은 온혈동물의 장내세균군에 속하여야 한다.
- 병원균이 존재하는 곳에는 반드시 존재하여야 하고 오염되지 않은 물에서는 발견되지 않아야 한다.
- 병원균보다 더 많은 수가 존재하여야 한다.
- 식수와 폐수처리시설에서 소독에 병원균과 동일한 내성을 나타내야 한다.
- 물에서는 증식되어서는 안된다.
- 간편하고 신속하며 값싼 방법으로 감지되어야 한다.
- 지표생물은 비병원성이어야 한다.

되는 대장균군은 대변에서 많은 양이 분비된다. 오염된 물에서 대장균군 균체수는 대략 분변성 오염 정도에 비례하여 발견된다. 대장균군은 일반적으로 병원성 세균보다 까다롭기 때문에, 물에 대장균군이 존재하지 않는다는 것은 물을 사람이 마셔도 미생물학적으로 안전하다는 것을 의미한다. 역으로, 물에 대장균군이 존재한다는 것은 병을 유발하는 다른 세균도 존재할 수 있다는 것과 대장균군이 존재하는 물은 잠재적으로 마시기에 안전하지 않다는 것을 의미한다. 지표 미생물은 식품 공정의 효율적인 평가와 물과 폐수처리 과정을 평가하는데도 사용되어 왔다. 분변성 오염의 이상적인 평가자가 되려면 표 1과 같은 기준에 일치되어야 함을 제시하였는데, 불행히도 어떤 지표 미생물도 이러한 기준에 맞는 것은 없었다. 따라서 현재까지 다양한 그룹의 미생물이 제시되었고 지표미생물로 이용되었다.

## 지표미생물

지금까지 제안되었거나 일반적으로 사용되는 지표미생물은 다음과 같다(APHA 1989; Berg 1978; Ericksen and Dufour 1986; Olivieri 1983).

### 1. 총대장균군

*Escherichia coli*, *Citrobacter*, *Enterobacter*, *Klebsiella* 종들이 포함되는 총대장균군은 비교적 검출하기 쉽다. 특별히, 이 그룹들은 35°C로 48시간 배양하면 젖산 발효로 가스를 생성하는 모든 호기성과 통성 혐기성으로 그람 음성이며 포자를 형성하지 못하는 간균들이 포함된다(APHA 1989). 이들은 사람과 동물에서 다량( $2 \times 10^9$  coliforms day<sup>-1</sup> capita<sup>-1</sup>) 방출되지만, 이들 모두가 분변성 기원인 것은 아니다. 금세기 전반에 걸쳐 대장균군은 수영장물과 식수에서 분변성 오염을 측정하는데 표준 균주로 사용되었다. 경험을 통해 식수 100 ml에서 이

세균이 존재하지 않으면 수인성 질병의 발병을 막을 수 있다는 것을 알게 되었다. 하지만, 이 세균을 지표미생물로 사용하는데 많은 결점이 있다는 것을 알게 되었다. 대장균군의 모든 구성원은 자연수계 환경과 식수배급시스템에서 재생장(regrowth)할 수 있다는 것이 관찰되었다(Gleeson and Gray 1997). 대장균군의 사멸율은 수온과 물 속에 있는 유기물의 종류와 양에 따라 좌우된다. 만일 물 속에 상당량의 유기물이 존재하고 수온이 충분히 높다면, 세균은 증식할 것이다. 이러한 현상은 부영양화된 열대수역과 종이 제조 공장의 유출수, 폐수, 수계 퇴적토, 많은 비가 내린 후에 유기물이 많은 토양에서 관찰된 바 있다. 가장 큰 관심사는 식수배급시설에서 손상된 대장균군의 회복이나 생장인데, 왜냐하면 이러한 것들이 분변성 오염으로 잘못 판정될 수 있기 때문이다(Shuval *et al.* 1973). 대장균군은 염소(free chlorine)가 존재하더라도 배수관에서 발견되는 생물막에 군체를 형성하거나 생장할 수 있다. *E. coli*는 물 속에 있을 때보다 표면에 달라붙어 있을 때 염소에 대하여 2,400배 더 내성이 있다(LeChevallier *et al.* 1988).

물 속에는 많은 수의 종속영양세균이 있어 대장균군을 분리하는 선택배지에서 대장균군의 생장을 가릴 수 있으므로 대장균군의 본래 균체수보다 낮게 측정될 수 있다. 이러한 것은 호기성 종속영양세균의 수가 500 ml<sup>-1</sup>보다 초과할 때 종종 문제가 된다. 또한, 병원성 장내 바이러스와 원생동물이 소독약에 대하여 더 내성이 있고 더 오래 산다는 것이 대장균을 이러한 생물에 대한 지표로 사용하는 것을 제한시킨다. 하지만 아직까지 대장균군은 물에서 세균의 질을 평가하는데 장점이 있다.

물 속에 대장균이 존재하는 것을 알아보는 데는 세 가지 방법, 즉 최확수(Most Probable Number: MPN)법, 여과막법(membrane filter: MF), 존재-비존재(P-A) 시험법이 일반적으로 사용된다.

### 2. 분변성 대장균

비록 총대장균군이 오랜 기간동안 중요한 수질오염의 지표로 사용되었지만, 이 그룹에 속하는 많은 세균은 분변성 기원에 국한되지 않는다. 따라서, 좀더 명확히 분변성 기원의 대장균군인 분변성 대장균만을 측정할 수 있도록 방법이 개발되었다. 이들에 속하는 세균들로는 *Escherichia* 속과 *Klebsiella* 속으로 44.5°C로 24시간 배양하여 젖당을 발효하여 산과 가스를 생성할 수 있는 것으로 실험실에서 구별한다. 그러나 일반적으로, 이들의 존재는 온혈동물의 대변으로부터 오는 분변성 오염을 의미하지만, 사람과 동물에 의한 오염은 구별하지 못한

다. 오염되지 않은 열대 수역에서 대장균군과 분변성 대장균이 빈번한 출현하며 상당기간동안 생존할 수 있는 것은 이러한 세균들이 열대 수역에서 자연적으로 발생할 수 있다는 것을 암시한다. 따라서 이들은 열대 수역에서는 믿을만한 분변성 오염의 지표로 사용될 수 없음을 의미한다(Toranzos 1991).

몇몇 사람들은 *E. coli*는 다른 분변성 대장균 그룹과는 쉽게 구별되므로(예, urease가 없고,  $\beta$ -glucuronidase가 있음) 단독 지표로 사용하자고 제안하였다. 하지만 분변성 대장균군 역시 대장균군을 지표로 사용하는 것과 똑같은 몇 가지 제한요인이 있다. 즉, 재생장(regrowth)과 수처리에 대하여 바이러스나 원생동물보다 내성이 약하다는 것이다.

분변성 대장균은 대장균군을 감지하는 방법과 유사한 방법을 사용할 수 있다. MPN법에는 EC 액체배지를 사용하고, 물을 분석하는 막여과법에서는 m-FC배지를 사용한다. m-T7배지로 알려진 배지는 물에서 손상된 분변성 대장균을 회복시키는데 사용되도록 제안되었으며(LeChevallier *et al.* 1983), 결과는 물에서 더 많은 수가 발견되었다. 하수 시료에서 m-T7배지에 의한 분변성 대장균의 회복은 표준 m-FC 방법보다 3배나 더 높다. Colilert법은 대장균군과 *E. coli*를 동시에 24시간 내에 감지할 수 있는 장점이 있다.

### 3. 분변성 연쇄상구균

분변성 연쇄상구균(fecal streptococci)은 그람 양성 Lancefield 그룹 D 연쇄상구균의 한 그룹이다. 분변성 연쇄상구균은 *Enterococcus*와 *Streptococcus* 속에 속한다(Gleeson and Gray 1997). *Enterococcus* 속은 일정한 생화학적 특성을 공유하고 생장에 불리한 조건에서 광범위하게 잘 견디는 모든 연쇄상구균이 이에 속한다. 그들은 6.5%의 NaCl, pH 9.6, 45°C에서 잘 자라는 면에서 다른 연쇄상구균과 구별되고, *Ent. avium*, *Ent. faecium*, *Ent. durans*, *Ent. faecalis*, *Ent. gallinarum*이 이들에 속한다. 이들은 인간과 온혈동물에 일반적으로 서식하기 때문에 물에서 분변성 오염을 감지하는데 사용한다. 이들은 수계환경에서 잘 견디지만 증식하지는 않는다. 수처리 분야에서는 이 그룹을 *Streptococcus* 속이라고도 부른다. *Streptococcus* 속 중 *S. bovis*와 *S. equinus*만이 진정한 분변성 연쇄상구균이라고 여겨진다. 이 두 종의 연쇄상구균은 동물에서 주로 발견되며, *Ent. faecalis*와 *Ent. faecium*은 인간의 장에 국한되어 발견된다. 따라서 이들은 특히 해수나 생물체에서 바이러스의 존재를 나타내는 지표로 유용하다. 분변성 대장균/분변성 연쇄상

표 2. FC/FS의 비율

FC/FS 비	오염 원
>4.0	인간에 의한 오염가능성이 매우 높다.
2.0~4.0	혼합된 오염원으로 주로 인간에 의한 오염가능성이 높다.
0.7~2.0	혼합된 오염원으로 주로 가축에 의한 오염가능성이 높다.
<0.7	동물에 의한 오염가능성이 매우 높다.

구균(FC/FS)의 비가 4 또는 그 이상이면 인간에게서 기원된 오염이며, 0.7 미만이면 동물에서 기원된 오염이라고 알려져 왔다(Geldreich and Kenner 1969)(표 2). 하지만, 이러한 FC/FS 비율은 최근 24시간 이내에 일어난 오염에만 정확성이 있고 염소처리된 물에서는 정확성을 믿을 수 없어 몇몇 학자들은 이들의 유용성에 대하여 회의적이다(Pourcher *et al.* 1991).

막여과법과 MPN법 모두 분변성 연쇄상구균의 분리에 사용할 수 있다. 막여과법은 분변성 연쇄상구균배지를 37°C에서 24시간 배양하여 사용한다. 모든 적색, 적갈색, 분홍색 콜로니(2,4,5-triphenyltetrazolium chloride가 formazan으로 환원되는 것에 기인함)는 잠재적인 분변성 연쇄상구균으로 계수한다. 분변성 연쇄상구균으로의 확정은 bile aesculin agar에서 44°C로 18시간 배양하여 확인한다. 분변성 연쇄상구균은 aesculin의 환원으로 콜로니 주변에 명확한 갈색 또는 검은 색의 테를 형성하며, *Ent. faecium*은 인간의 장에 더 특이성이 있다.

분변성 연쇄상구균은 지표세균으로서 대장균이나 분변성 대장균보다 다음과 같은 면에서 장점이 있다. 즉, 분변성 연쇄상구균은 물에서 거의 증식하지 않으며, 대장균군보다 환경적 스트레스와 염소처리에 더 내성이 있고, 환경에서 비교적 오랫동안 생존한다(Gleeson and Gray 1997). 장내구균은 위탁수에서 수영하는 사람들의 장염에 대한 위험성에 유용한 지표로 제시되었고 기준이 권장되었다(Cabelli 1989). 그들은 또한 환경에서 장바이러스의 존재에 유용한 지표로 제시되었다.

### 4. 혐기성 세균

#### 1) *Clostridium perfringens*

*Clostridium perfringens*는 황 환원, 혐기성, 포자 형성, 그람 양성의 간균으로 직장에서 발견되며 분변성 세균의 약 0.5%를 차지한다. 이들은 열에 내성이 높으며(75°C에서 15분), 수계환경에서 오래 동안 생존하고, 환경 스트레스와 소독제에 매우 강한 포자를 만든다. 이들은 단단한 포자를 갖고 있어 이 세균을 지표세균으로 사용하

기에는 너무 내성이 강하다. 그럼에도 불구하고, *Clostridium perfringens*는 과거에 일어난 오염의 지표와 병원균의 운명을 추적하는데 사용되도록 권장되었고, 식수와 폐수처리에서 원생동물이나 바이러스의 제거를 나타내는 지표로 사용되었다(Payment and Franco 1993). 이들은 또한 위락수의 수질을 나타내는 촉망받는 지표로 권장되었다(Fujioka 1997). 이 세균은 또한 해양에서 분변성 오염을 추적하는데 믿을만한 지표로 여겨진다(예, 해양 투기로 영향을 받는 해양 퇴적토). 그리고 이들은 슬러지가 투기된 퇴적토에서 오랜 기간동안(1년 이하) 생존한다(Burkhardt and Watkins 1992; Hill *et al.* 1993, 1996).

## 2) *Bifidobacterium*

*Bifidobacterium*은 혐기성이며 포자를 형성하지 않는 그람 양성균으로 분변성 오염지표로 권장되었다. *Bifidobacterium*은 인간의 장내 미생물 중 3번째로 많이 발견되는 속이다. 이들 중 몇몇(예, *B. bifidum*, *B. adolescentis*, *B. infantis*)은 인간과 주로 관련이 있기 때문에, 그들은 인간과 동물의 오염물을 구별하는데 도움이 될 수 있다. 이들의 감지는 요즈음 rRNA probe를 사용하여 가능하게 되었다.

## 3) *Bacteroides* spp.

이들 혐기성 세균은 대변 1g당  $10^{10}$  cells의 농도로 장기관에 존재하고, 물 속에서 *B. fragilis*의 생존은 *E. coli*나 *S. faecalis*보다 낮다. 이 세균에 대한 형광성 항혈청 검사는 물에서 분변성 오염을 나타내는데 유용한 방법으로 사용될 수 있다는 것을 시사하였다(Fiksdal *et al.* 1985; Holdeman *et al.* 1976).

## 5. 종속영양세균의 계수

유기물로부터 에너지와 탄소원을 얻는 물 속의 호기성 및 통성 혐기성 세균의 수를 측정하는데는 종속영양 배지 계수(heterotrophic plate count 또는 HPC)를 수행한다. 발견되는 세균수는 배지의 조성, 배양기간(1~7일), 배양온도(20~35°C)에 따라 좌우된다(Reasoner 1990). 이 그룹들은 다음 속과 같은 그람 음성세균을 포함한다. 즉, *Pseudomonas*, *Aeromonas*, *Klebsiella*, *Flavobacterium*, *Enterobacter*, *Citrobacter*, *Serratia*, *Acinetobacter*, *Proteus*, *Alcaligenes*, *Moraxella*이다. 처리되지 않은 식수와 염소 처리된 배급수에서 출현하는 이 세균들은 표층수와 지하수, 토양과 채소에서 흔히 발견된다(LeChevallier *et al.* 1980). 이들은 표층수와 지하수에서 쉽게 분리되며, 토양과 채소에도 널리 분포되어 있다. 이

들 중 일부는 기회적 병원균(opportunistic pathogen)(예, *Aeromonas*, *Pseudomonas*, *Flavobacterium*)이지만 식수에 의해 그들이 전파된다는 결정적인 증거는 없다. 식수에서, 종속영양세균의 수는 1 CFU ml<sup>-1</sup> 이하에서부터 10<sup>4</sup> CFU ml<sup>-1</sup> 이상으로 다양하다. 그리고 그들은 주로 온도, 잔류염소량, 동화될 수 있는 유기물의 양에 의해서 영향을 받는다. 실제로, 이들을 측정하는 것은 건강 문제와 관련이 거의 없다. 하지만, 이들은 수도관의 저장수와 여과장치에서 많은 수가 자랄 수 있기 때문에 문제가 되었다. 그러한 문제와 관련하여, 병에 대한 종속영양세균의 영향을 평가하는 연구가 이루어졌다. 이 연구에서 다량의 종속영양세균이 함유된 식수를 마시는 사람이 병에 대하여 별 영향이 없는 것으로 나타났다. 비록 종속영양세균이 분변성 오염의 직접적인 지표는 아니지만, 그것은 실제 수질의 변화를 의미하며 병원성 세균의 생존과 재생장의 잠재력을 의미한다. 이들 세균들은 또한 많은 수가 존재할 때 대장균과 분변성 대장균을 검출하는데 방해가 된다. 수돗물에서 종속영양세균의 수는 500 개체 ml<sup>-1</sup>가 넘지 않도록 권장한다(LeChevallier *et al.* 1980).

일반적으로 종속영양세균은 Yeast extract 배지에서 평판배지 도말법으로 35°C에서 48시간 배양하여 계수한다. 저영양배지인 R<sub>2</sub>A(Reasoner and Geldreich, 1985)가 널리 사용되고 소독약에 손상된 세균에 권장된다. 이 배지는 28°C에서 5~7일 배양하도록 한다. 종속영양세균의 수는 배양온도, 성장배지, 배양시간에 따라 커다란 차이를 보인다. 종속영양세균의 수는 다음과 같은 점에서 수처리에 종사하는 자에게 유용하다(AWWA 1987; Grabow 1990; Reasoner 1990).

- 수처리 시설에서 소독을 포함한 여러 처리과정에서 효율을 평가하는데
- 처리가 끝난 물을 저장하거나 배급하는 동안에 미생물학적 수질을 모니터링할 때
- 처리와 배급에 사용되는 시설의 표면에 세균이 자라는 것을 결정할 때
- 배급시설의 처리수에서 재생장이나 후생장(aftergrowth)의 가능성을 결정할 때

## 6. 박테리오파지

박테리오파지(bacteriophage)는 장바이러스(enteric virus)와 유사하지만, 환경에서 더 쉽고 더 빠르게 감지할 수 있고, 장바이러스보다 폐수와 다른 환경에서 더 많은 수가 발견된다(Bitton 1980; Goyal *et al.* 1987; Grabow 1986). 또한 하수와 오염된 물에 지속적으로 존

재하기 때문에 박테리오파지의 사용은 분변성 오염에 유용한 지표로 제안되었다. 이들은 또한 바이러스 오염의 지표로서도 제안되었다. 이것은 수계환경에 있는 많은 박테리오파지가 장바이러스와 구조, 형태 뿐만 아니라 행동도 거의 유사하기 때문이다. 이러한 이유로, 소독약에 대한 바이러스의 내성을 평가하는 데에도 널리 사용되고, 물과 폐수의 처리, 표층수와 지하수에서 바이러스의 생존여부를 측정하는 데에도 사용되었다. 분변성 오염의 지표로 박테리오파지의 사용은, 물 시료에서 그들의 존재는 파지를 복제시키는 것을 도와줄 수 있는 세균의 존재 가능성이 있다는 가정에 기초한다. 박테리오파지들 중 콜리파지(coliphage)가 주로 연구되었는데, 많은 연구자들은 콜리파지를 연안(O'Keefe and Green 1989), 해수(Borrego *et al.* 1987), 위락용 담수(Dutka *et al.* 1987), 식수(Ratto *et al.* 1989)에서 수질의 지표로 사용할 수 있는 잠재성을 제시하였다. 콜리파지의 검출은 단순하고 비용이 적게드는 기술로 8~18시간만에 결과를 나타내는 장점이 있다. 콜리파지를 검출하는데는 1~100 ml의 용량으로 평판배지법과 MPN법이 모두 사용될 수 있다. F-특이 콜리파지(F-specific coliphage)가 가장 주목을 받는데 왜냐하면, 그들은 인간의 많은 병원성 장바이러스와 크기와 형태가 유사하기 때문이다. 콜리파지 f2,  $\phi$ 174, MS-2, PRD-1은 지표와 소독약을 평가하는데 가장 널리 이용되는 파지들이다. F-특이 파지는 인간의 분변물에서 자주 발견되지 않고, 분변성 오염과 직접적인 관련이 없으므로 그들은 분변성 오염의 지표로 생각할 수 없다. 하지만, 폐수에서 많은 수가 존재하는 것과 염소에 비교적 높은 내성을 보이는 것은 폐수의 오염의 지표와 장바이러스의 잠재적 지표로 고려하는데 기여한다.

*Bacteroides fragilis*의 박테리오파지도 환경에서 인간 바이러스의 잠재적인 지표로 시사되었다(Tartera and Jofre, 1987). *Bacteroides* spp.는 절대혐기성이며 인간의 대변에 다량으로 존재하여 이들을 대상으로 활동하는 박테리오파지는 바이러스 오염의 적절한 지표로 잠재력을 갖고 있다. *B. fragilis*에 감염되는 박테리오파지는 전적으로 사람이 기원인 것 같고 인간의 대변으로 오염된 환경에서만 존재한다. 이것이 사람과 동물의 오염을 구별짓는데 도움을 줄 수 있다. 그들은 자연서식지에는 없는데 그것이 인간의 장 이외의 환경에서도 발견되는 콜리파지에 비해 장점이다. 그들은 환경에서는 증식하지 않고 환경에서 그들의 사멸율은 인간의 장바이러스와 비슷한 것 같다. 하지만, 그들의 숙주는 배양하는데 복잡하고 까다로운 방법이 요구되는 혐기성세균이어서 일상적인 지표로서의 적합성에 한계를 나타낸다.

## 7. 그 외의 지표세균

많은 다른 미생물들도 대안의 지표미생물로 또는 다른 응용(예, 위락수)에 사용될 수 있는 잠재력을 갖고 있다. 이들에는 *Pseudomonas* spp., 효모, acid-fast mycobacteria (*Mycobacterium fortuitum*과 *M. phlei*), *Aeromonas* 그리고 *Staphylococcus*가 있다. 특히 효모와 acid-fast mycobacteria는 소독 효율을 측정하는데 지표로 사용된다. *Pseudomonas* 속내에서 공중보건과 관련이 있는 것은 *P. aeruginosa*로 그람 음성, 비포자성 간균이다. 이 세균과 관련이 있는 가장 일반적인 병은 눈, 귀, 코와 목에 감염된다. 이들은 또한 화상을 입은 사람이나 면역력이 저하된 사람에게 생명을 위협하는 감염을 주는 가장 일반적인 기회적 병원균이기도 하다. *Pseudomonad*의 특성은 청록색 색소인 pyocyanin이나 형광색소인 fluorescein를 생성하거나, 또는 모두를 생성한다. 모낭염, 피부염, 그리고 귀와 요도의 감염은 오염된 물이나 잘 관리되지 않은 수영장이나 목욕탕과 관련이 있는 *P. aeruginosa*에 의한다. 이러한 관계 때문에, 하수에서의 끊임 없는 출현으로 *P. aeruginosa*는 수영장물과 목욕물, 그리고 다른 위락수에서 잠재적인 지표로 제안되어 왔다(Cabelli 1978). 하지만, 이러한 세균은 자연계에 널리 퍼져있는 것으로 알려져 있고 자연상태에서 증식할 수 있다(증류수에서조차도 증식할 수 있다). 그래서 분변성 오염연구에는 별 가치가 없다고 생각된다.

대장균은 수년동안 수영장물의 안전을 평가하는데 사용되었지만, 아직도 오염은 종종 분변성 오염이 기원이라 호흡기와 피부, 눈과 관련이 있다. 이러한 이유로 그람 양성균인 *Staphylococcus aureus*와 효모 *Candida albicans*가 각각 수영장과 관련된 이러한 오염에 더 좋은 지표로서 제안되었다. 위락수는 *S. aureus*에 의해서 생기는 피부감염의 매체로 기여할 수 있고, 몇몇 연구자들은 이들 세균을 위락수의 위생과 관련된 추가적인 지표로 사용하기를 권장하였는데 왜냐하면, 그들의 존재는 위락수에서 인간의 활동과 관련이 있기 때문이다(Charoena and Fujioka 1993). *Aeromonas* 속은 Vibrionaceae 과에 속하는 그람 음성의 간균이다. *Aeromonas hydrophila*만이 잠재적인 위생학적 중요성으로 주목을 받아왔다. *Aeromonas*는 오염되지 않은 물뿐만 아니라 하수와 하수로 오염된 물에서도 발견된다. 이 세균은 인간과 온혈동물, 어류와 같은 냉혈동물에 병원균이 될 수 있다. *A. hydrophila*와 관련된 식품관련 질병이 기록된 적이 있었으며 사람에게도 기회적 병원균으로 여겨진다. 영양상태가 풍부한 것과 관련이 있기 때문에 자연수의 영양상태를 나타내는 지표로도 제안되었었다. 표 3은 수

표 3. 수질 지표 및 그들의 기원과 잠재적 사용처

지 표	중요 기원 <sup>a</sup>	잠재적인 사용 <sup>b</sup>
Coliforms	FS I R A	S
Fecal coliforms	FS I R A	FS
Enterococcus	FS	FS A D
Clostridium perfringens	FS	F S D
Candida albicans	FS	P F S
Bifidobacteria	FS	F S A D
Coliphage	S	S
Pseudomonas aeruginosa	S I R A	P S N
Aeromonas hydrophila	S I R A	P S N

<sup>a</sup>다른 기원과 관련: F, 온혈동물의 대변; S, 하수; I, 공업용폐수; R, 오염되지 않은 토양에서 유출; A, 담수 및 해수.

<sup>b</sup>잠재적 이용: P, 병원균; F, 분변성 지표; S, 하수 지표; A, 하등동물기원으로부터 인간 분리; D, 분변성 오염에 근접; N, 영양물질 오염지표. Cabelli (1978) 인용.

질을 평가하는데 사용되는 잠재적인 미생물 지표를 요약하였다.

8. 지표의 표준과 기준

대장균과 같은 세균 지표는 수질 표준(water quality standards) 개발에 사용되었다. 예를 들어, 미국 환경보호청(U.S. EPA)에서는 식수 100 ml당 대장균이 한 마리도 발견되지 않도록 표준을 정하였다. 미국에서 식수 표준은 법으로 시행된다. 만일 이러한 표준을 물 공급자들이 위반하게 되면, 그들은 시정 명령을 받거나, 주정부 또는 연방정부로부터 벌금을 받는다. 1974년 의회에서 안전식수법을 제정하였을 때 정부는 미국환경보호청에서 식수표준을 정하도록 했다. 미국 내의 여러 주정부에서 정한 미생물 표준과 유럽연합에서 사용되는 표준은 표 4, 표 5와 같다.

기준(criteria)과 지침서(guideline)는 지표미생물이 허용 수준을 권장하는 것을 서술하는 용어이다. 그들은 법적으로 강제적인 것은 아니지만 잠재적인 수질문제가 존재하는 곳에서 의미있는 지침으로 제공된다. 이상적인 것은, 모든 표준은 용납하기 힘든 공중보건 위험이 존재하는 것을 나타내거나, 병의 정도와 지표미생물 수준간에 어떤 관계를 나타내는 것이다. 그러한 정보는 혼란을 주는 요인들 때문에 비용이 많이 드는 유행병 연구가 아니면 해석할 수 없는 것이 포함되어있어 얻기 힘들다. 유행병학에서 기준을 정하는데 사용되었던 분야 중에 하나는 위락용 수영장이었다. 미국내의 유행병학 연구에서는 수영과 관련된 장염과 장 구균(enteric cocci) 및 분변성 대장균의 균체수와 관계를 언급하였는데, 대장균과는 관계가 없었다(Cabelli 1989). 해수에서 수영은 표준 기하학적 평균이 35 enterococcus/100 ml인 곳이 권장된

표 4. 미국 연방정부와 주정부의 미생물 기준

기 관	표 준
미국 환경보호청	
안전식수법	0 대장균/100 ml
깨끗한 물 법	
폐수 방류	200 분변성대장균/100 ml
하수 슬러지	< 1000 분변성대장균/4 g
	< 3 Salmonella/4 g
	< 1 장바이러스/4 g
	< 1 기생충 알/4 g
캘리포니아주	
폐수의 관개 이용	≤2.2 MPN 대장균
애리조나주	
폐수의 골프장 관개 이용	25 분변성대장균/100 ml
	125 장바이러스/40 l
	Giardia가 발견 안됨/40 l

표 5. 유럽연합의 식수기준

수돗물	표준
Escherichia coli	0/100 ml
분변성 연쇄상구균	0/100 ml
황환원 clostridia	0/20 ml
병에 들어 있는 물	
Escherichia coli	0/250 ml
분변성 연쇄상구균	0/250 ml
황환원 clostridia	0/50 ml
Pseudomonas aeruginosa	0/250 ml

European Union (1995) 인용.

표 6. 위락수 수질 지침서

국가 또는 기관	제 도 (시료수/시간)	기준 또는 표준 <sup>a</sup>
미국, EPA	5/30일	200 분변성 대장균/100 ml 400/ml를 초과할 때 <10% <sup>b</sup> 담수: 33 장구균/100 ml 126 분변성대장균/100 ml 해수: 35 장구균/100 ml
유럽연합	2/30일 <sup>c</sup>	500 대장균/100 ml 100 분변성 대장균 /100 ml 100 분변성 연쇄상구균/100 ml 0 Salmonella/l 0 장바이러스/10l
온타리오, 캐나다		≤1000 대장균/ 100 ml ≤100 분변성 대장균/ 100 ml

<sup>a</sup>모든 세균의 수는 기하학적인 평균임. <sup>b</sup>1986년에 제안됨.

<sup>c</sup>대장균과 분변성 대장균만 해당. Saliba, 1993; U.S. EPA, 1986 인용.

다. 이것은 수영하는 사람의 1.9%는 장염으로 발전할 수 있는 위험 확률이 있음을 의미한다(Kay and Wyer 1992). 수영을 함으로서 얻을 수 있는 병의 수많은 다른

전염병학적인 연구가 수행되었다. 이러한 연구들은 병과는 약간 다른 관계를 보여주었고 다른 세균 지표가 병 발생률을 더 예견할 수 있었다. 이러한 차이점은 아마도 서로 다른 오염원(미처리수와 처리수), 위락수의 유형(해수와 담수), 병의 유형(장염, 눈병, 피부병), 인구의 면역 상태, 관찰 기간 등 때문에 생길 것이다. 다양한 허용할 수 있는 지표 세균 수의 지침서가 사용되고 있지만(표 6) 표준에 대한 일반적인 동의는 없다. 미생물 표준의 사용도 표준 방법과 모니터링 할 수 있는 정량적 실험실 기준이 있어야 한다. 시료를 채취하는 방법과 시기도 중요하다. 이러한 모든 정보는 표준이 정해지면 항상 규제에 명시되어야 한다. 이상에서 언급한 것과 같이, 표준을 정하고 기준을 마련하는 것은 어려운 과정이며, 아직까지 이상적인 표준이 없다. 따라서 과학자들과 보건 관계자, 규제기관에 의한 많은 판단이 요구된다.

### 참 고 문 헌

- APHA. 1989. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 17th Ed. American Public Health Association, Washington, DC.
- AWWA Organisms in Water Committee. 1987. Committee report: Microbiological consideration for drinking water regulations revisions. J. Am. Water Works Assoc. 79:81-88.
- Berg G. ed. 1978. Indicators of Viruses in Water and Food. Ann Arbor Scientific Publications, Ann Arbor, MI.
- Bitton G. 1980. Introduction to Environmental Virology. John Wiley & Sons, New York. 326 pp.
- Borrego JJ, MA Morinigo, A de Vicente, R Cornax, and P Romero. 1987. Coliphages as an indicator of fecal pollution in water. Its relationship with indicator and pathogenic microorganisms. Water res. 21:1473-1480.
- Burkhardt W III and WD Watkins. 1992. *Clostridium perfringens* provides the only reliable measure of human contamination in the marine environment (abst. Q-257). In 92nd Meeting of the American Society of Microbiology, May 26-30, New Orleans, LA.
- Cabelli V. 1978. New standards for enteric bacteria. In Water Pollution Microbiology. Vol. 2 (Mitchell R. ed.) Wiley-Interscience, New York, pp.233-273.
- Cabelli VJ. 1989. Swimming-associated illness and recreational water quality criteria. Water Sci. Technol. 21:13-21.
- Charoenc N and RS Fujioka. 1993. Assessment of *Staphylococcus* bacteria in Hawaii recreational waters. Water Sci. Technol. 27:283-289.
- Dutka BJ, A El Shaarawi, MT Martins and PS Sanchez. 1987. North and South American studies on the potential of coliphage as water quality indicator. Water Res. 21:1127-1134.
- Ericksen TH and AP Dufour. 1986. Methods to identify water pathogens and indicator organisms. pp.195-214. In Waterborne Diseases in the United States (Craun GF, ed.) CRC Press, Boca Raton, FL.
- European Union (EU). 1995. Proposed for a Council Directive concerning the quality of water intended for human consumption. Com (94) 612 Final. Offic. J. Eur. Union. 131:5-24.
- Fiksdal L, JS Maki, SJ LaCroix and JT Staley. 1985. Survival and detection of *Bacteroides* spp., prospective indicator bacteria. Appl. Environ. Microbiol. 49:148-150.
- Fujioka RS. 1997. Indicator of marine recreational water quality. pp.176-183. In Manuals of Environmental Microbiology (Hurst CJ, GR Knudsen, MJ McInerney, LD Stetzenbach and MV Walter eds.). ASM Press, Washington, DC.
- Geldreich EE and BA Kenner. 1969. Comments on fecal streptococci in stream pollution. J. Water Pollt. Control Fed. 41:R336-R341.
- Gerba CP. 1987. Phage as indicators of fecal pollution. pp. 197-209. In Phage Ecology (Goyal SM, CP Gerba and G Bitton eds.). Wiley-Interscience, New York.
- Gleeson C and N Gray. 1997. The coliform index and waterborne disease. E and FN Spon, London.
- Goyal SM, CP Gerba and G Bitton. 1987. Phage Ecology. Wiley Interscience, New York, 321pp.
- Grabow WOK. 1986. Indicator systems for assessment of the virological safety of treated drinking water. Water Sci. Techno. 18:159-165.
- Grabow WOK. 1990. Microbiology of drinking water treatment: Reclaimed wastewater. pp.185-203. In Drinking Water Microbiology (McFesters GA ed.). Springer-Verlag, New York.
- Hill RT, IT Knight, MS Anikis and RR Colwell. 1993. Benthic distribution of sewage sludge indicated by *Clostridium perfringens* at a deep-ocean dump sites. Appl. Environ. Microbiol. 59:47-51.
- Hill RT, WL Staube, AC Palmisano, SL Gibson and RR Colwell. 1996. Distribution of sewage indicated by *Clostridium perfringens* at a deep-water disposal site after cessation of sewage disposal. Appl. Environ. Microbiol. 62:1741-1746.
- Holdeman LV, IJ Good and WEC Moore. 1976. Human fecal flora: variation in human fecal composition within individuals and a possible effect of emotional stress. Appl. Environ. Microbiol. 31:359-375.

- Kay D and M Wyer. 1992. Recent epidemiological research leading to standards. pp.129-156. In *Recreational Water Quality Management*. Vol. 1. Coastal Waters (Kay D ed.) Ellis Horwood, Chichester, UK.
- LeChevallier MW, RJ Seidler and TM Evans. 1980. Enumeration and characterization of standard plate count bacteria in chlorinated and raw water supplies. *Appl. Environ. Microbiol.* 40:922-930.
- LeChevallier MW, SC Cameron and GA McFesters. 1983. New medium for improved recovery of coliform bacteria from drinking water. *Appl. Environ. Microbiol.* 45:484-492.
- LeChevallier MW, CP Cawthen and RG Lee. 1988. Factors promoting survival of bacteria in chlorinated water supplies. *Appl. Environ. Microbiol.* 54:649-654.
- O'Keefe B and J Green. 1989. Coliphages as indicators of fecal pollution at three recreational beaches on the first and fourth. *Water Res. Water.* 23:1027-1030.
- Olivieri VP. 1983. Measurement of microbial quality. In *Assessment of Microbiology and Turbidity standards for Drinking Water* (Berger PS and Y Argaman eds.) EPA Report No. EPA 570-9-83-001. Office of Drinking Water, Washington, DC.
- Payment P and E Franco. 1993. *Clostridium perfringens* and somatic coliphages as indicators of the efficiency of drinking water treatment of viruses and protozoan cysts. *Appl. Environ. Microbiol.* 59:2418-2424.
- Pourcher A-M, LA Devriese, JF Hernandez, JM Delattre, 1991. Enumeration by a miniaturized method of *Escherichia coli*, *Streptococcus bovis* and enterococci as indicators of the origin of fecal pollution of waters. *J. Appl. Bacteriol.* 70:525-530.
- Ratto A, BJ Dutka, C Vega, C Lopez and A El-Shaarawi. 1989. Potable water safety assessed by coliphage and bacterial tests. *Water Res.* 23:253-255.
- Reasoner DJ, and EE Geldreich. 1985. A new medium for enumeration and subculture of bacteria from potable water. *Appl. Environ. Microbiol.* 49:1-7.
- Reasoner DJ. 1990. Monitoring heterotrophic bacteria in potable water. pp.452-477. In *Drinking Water Microbiology* (McFesters GA ed.) Springer Verlag, New York.
- Saliba L. 1993. Legal and economic implication in developing criteria and standards. pp.57-73. In *Recreational Water Quality Management* (Kay D and R Hanbury eds.) Ellis Horwood, Chichester, UK.
- Tartera C and J Jofre. 1987. Bacteriophage active against *Bacteroides fragilis* bacteriophage as indicators of virological quality of water. *Water Sci. Technol.* 18:1623-1637.
- Toranzos GA. 1991. Current and possible alternative indicators of fecal contamination in tropical waters: A short review. *Environ. Toxicol. Water Qual.* 6:121-130.
- US EPA. 1986. United States Environmental Protection Agency. Ambient water quality. Criteria-1986. EPA 440/5-84-002. Washington, DC.

(Received 29 July 2002, accepted 30 August 2002)