

수경시설 물놀이에 따른 대장균 감염의 위해도 분석

조영근[†]

경성대학교 기초과학연구소 생물학연구부 및 생물학과

Risk Assessment of *Escherichia coli* Infection from Use of Interactive Waterscape Facilities

Young-Gun Zo[†]

Research Institute for Basic Science and Department of Biology, Kyungsoo University, Busan, Korea

ABSTRACT

Objectives: With the goal of quantifying the risk of children contracting gastroenteritis while playing at interactive waterscape facilities and evaluating the adequacy of current water quality regulations, risk assessment was performed with *Escherichia coli* as pathogen.

Methods: Abundances of *E. coli* in the waters of interactive water features in South Korea were acquired from survey reports. A gamma distribution describing the volume of water swallowed by children during swimming activities was adopted. Exposure rate and risk were calculated by Monte Carlo simulation and dose-response models for various pathogenic *E. coli*.

Results: *E. coli* was detected in 25 out of 40 facilities, with range of ~1,600 CFU/100 ml. The abundance fitted an exponential distribution. Simulated exposures ranged $\sim 1.9 \times 10^{10}$ CFU, varying greater along *E. coli* abundance than the volume of water. Risk of children being infected by enterohemorrhagic *E. coli* was high, with range of ~0.85. When *E. coli* abundance was <200 CFU/100 ml, which is the current government threshold, the risk decreased to <0.43. Although the guideline successfully reduced the risk of adults being infected by a less virulent *E. coli* strains (<0.03), the risk for children could not be quantified due to lack of dose-response models for those pathogens for children.

Conclusions: Under the current guideline, children are at risk of being infected if water is contaminated with by enterohemorrhagic *E. coli*. For other *E. coli* strains, the risk appears to be considerably less. The result warrants need for developing dose-response models for children for each pathogenic *E. coli* strain.

Key words: *Escherichia coli*, Exposure, Interactive fountain, Risk assessment

I. 서 론

한국 내 시민의 생활환경이 대체로 휴식을 위한 경관 요소가 미흡한 도심환경으로 변화하면서, 최근, 경관과 위락을 용도로 하는 바닥분수 등의 물놀이용 수경시설이 급증하고 있다. 각급 지방자치단체들과 민간 기업에 의해 설치·운영되는 수경시설의 수가

1,396곳에 이르는 것으로 보고된 바 있으며, 물놀이 용의 유형인 바닥분수와 계류시설은 각각 32%, 12% 를 차지한다.¹⁾ 수경시설을 물놀이, 피서 등의 용도로 이용하는 시민들은 안전 관리자의 배치 유무와 용수의 음용 적합성을 우려하는 안전성 요소로 꼽았으며, 특히, 20~50대에 속하고 자녀를 둔 시민들은 전반적인 수질의 양호도에 대하여 우려하며, 자녀의

[†]Corresponding author: Research Institute for Basic Science and Department of Biology, Kyungsoo University, Busan 608-736, Korea, Tel: +82-51-663-4643, Fax: +82-51-627-4645, E-mail: zoyful@gmail.com

Received: 17 January 2012, Revised: 6 February 2012, Accepted: 14 February 2012

오염수에 대한 노출을 가장 우려하는 인식을 보이고 있다.²⁾

오염된 물놀이 시설의 물을 접촉하여, 세균 감염 등 위해성이 도입되는 경로로, 물이 피부에 접촉하는 경우와 물을 마시는 경우가 대부분이지만, 기도로 물방울이 흡입되는 경우, 눈 또는 귀 등 특정 기관이 물의 접촉을 통해 감염되는 경우도 포함된다. 국내에서 수경시설 물놀이로 인한 역학적 사건이 보고된 바는 없지만, 외국의 경우는 집단감염의 사례들이 꾸준히 보고되고 있다.³⁻⁸⁾ 미국에서 수경시설 관련 집단감염의 주요 질병은 위장염(gastroenteritis)으로, *Cryptosporidium parvum*와 *Shigella sonnei*가 병원체로 확인되고 있다. 환경부는 2010년 8월 수질관리 지침과 시설 이용객에 대한 감독·안내 방안을 내용으로 하는 ‘물놀이형 수경시설의 수질관리 지침’을 마련하여 국가 및 지방자치단체가 운영하는 수경시설에 적용하고 있다.⁹⁾ 그럼에도 불구하고, 2011년 7월 조사된 결과에 의하면, 서울시내 어린이공원 바닥분수의 41%가 지침상의 수질 기준을 초과하고, 이용객에 대한 안내와 지도마저 아직 미흡한 실정이다.¹⁰⁾ 따라서, 환경부 수질관리 지침을 준수하지 않아 발생하는 어린이 위장염 집단감염의 우려가 수경시설에 상존한다고 볼 수 있다.

최근 보고된 어린이들의 물놀이 시설 행동 양식 분석 결과를 참조하면, 현행 수질관리 지침이 실질적으로 어린이들에게도 유효한지 검토해 보아야 할 필요성이 제기된다. Nett *et al.*¹¹⁾의 관찰에 따르면, 어린이들은 물놀이 시설에서 감독요원에 의한 지도 유무와 상관없이 엉덩이를 물 뿜는 곳에 대고 놀며, 약 절반 정도가 물놀이 용수를 입으로 받아 마시는 행위를 한다. 물놀이 수경시설의 이용자들이 주로 어린이들이고, 어린이들의 면역력이 성인에 비하여 미약하다는 점을 고려하면, 현행 대장균수에 대한 지침의 실효성에도 검토의 여지가 있다. 어린이의 면역력이 성인에 비하여 낮다는 점은 일반적으로 적용될 수 있을 뿐만 아니라, 5세 이하 집단이 5~10세 어린이들에 비하여 대장균 감염에 5배 높은 위해도를 보인다는 보고¹²⁾와 *Enterococcus* 농도와 위장염의 상관성이 <10세 이하 아동에서 만 나타난다는 결과¹³⁾는 대장균수의 현행 기준을 모든 연령에 일괄적으로 적용하는 것이 실제로 유효한지 검토할 필요성을 제기한다.

본 연구는 미생물학적 위해성 평가 방법으로 어린이가 물놀이용 수경시설을 이용하는 데 따르는 소화기 대장균 감염 위해성이 어떻게 분포하는 지 살펴보고, 현행 환경부 관리 지침이 이용하는 어린이들의 대장균 감염 위해도를 효과적으로 저감하고 있는지 분석하였다. 국내 물놀이용 수경시설들의 용수 중 대장균의 수를 문헌을 통해 수집하고, 알려진 모델들을 사용하여 노출량과 위해도를 산정하였다.

II. 연구 방법

1. 국내 물놀이용 수경시설의 수질 자료

대장균 수를 포함하는 수질항목들을 국내 물놀이용 수경시설의 용수에서 조사하여 보고한 문헌으로 3건이 확인되었다. 그 중 2건은 대장균 수를 100 ml의 용수당 200 CFU 이하로 관리하도록 규정한 환경부의 수질관리 지침이 2010년 8월 시행되기 이전에 조사되었고, 나머지 한 건은 지침 시행 이후에 조사되었다. 한국생활안전연합이 2011년 7월 20-21일 동안 서울시 18개 구에 소재한 어린이공원 22개소의 바닥분수와 폭포 등 물놀이용 수경시설의 용수 시료를 채취하고, 서울시 보건환경연구원이 수질항목들을 분석한 조사는 후자의 경우이다.¹⁰⁾ 환경부의 ‘수경시설 수질관리방안 연구 보고서’¹⁾와 전라북도 보건환경연구원이 자체적으로 수행한 ‘물놀이 분수 시설 수질실태 조사’¹⁴⁾의 보고는 환경부 지침 이전에 수행되었다. 2010년 6월에 수행된 환경부 조사의 경우, 서울지역 8개소, 경기지역 1개소, 부산지역 4개소 그리고 강원지역 5개소 등 전국 주요 지역에서 총 18개소의 수경시설을 조사하였는데, 이 중 바닥분수는 12개소, 일반분수 3개소, 물놀이분수 1개소, 벽천 1개소, 계류 1개소로, 주로 바닥분수가 조사의 대상이었다. 전라북도 자체 조사의 경우, 전주, 익산, 정읍, 남원, 김제, 부안에 있는 18개소의 수경시설을 대상으로 2010년 7-8월 중에 4회에 걸쳐 반복 조사한 경우였다.¹⁴⁾ 본 연구는, 이들 3개 조사자료에서 보고한 대장균수 자료를, 국내 수경시설 용수의 대장균수 현황 자료로 간주하고, 그로 인해 발생하는 위해도를 평가하였다.

2. 노출 평가

수경시설 이용자들의 소화기에 도입되는 대장균에

대한 노출량을 산정하기 위하여, 이용자들이 구강을 통해 음용하는 물의 양을 산정하여야 한다. 이를 위해, 음용량의 분포를 기술하는 모델이 필요하였다. 바닥분수를 위주로 수경시설의 물이 이용자의 입에 들어가는 경로는 에어로졸(aerosol)이 공기 중에 비산하여 구강에 안착하는 경로와 이용자가 고의로 물을 입에 대거나 핥는 등의 행위를 통해 음용하는 경로가 있다.

본 연구는 두 경로에 의해 접촉하는 물의 부피를, 각 경로를 통한 노출에 대하여 보고하는 문헌들에 기록된 노출량(부피)의 분포를 조사하여, 에어로졸의 영향이 과연 얼마나 유효한지를 우선 비교평가하였다. 분수의 유체역학적 수리모델을 만들어 에어로졸의 형성과 분포를 시뮬레이션 한 결과에 따르면, 물방울의 입경과 유입풍속에 따라 분수의 190 m 반경까지 확산 가능하였다.¹⁵⁾ 에어로졸을 가장 많이 흡입하는 상황은 분수와 직접 접촉하거나 근접한 상태에서 입으로 호흡을 하는 경우인데, 이는 샤워를 하는 상황과 유사하다. 상온의 물로 샤워를 1회 하는 동안 입으로 호흡할 시, 0.04-0.20 mg 정도의 에어로졸이 입안으로 섭취됨이 실험을 통해 알려져 있다.¹⁶⁾

에어로졸이 아닌 형태로 구강으로 섭취되는 분수 물의 양은 실험적으로 측정된 바가 없는데, 최근 수영을 할 때 음용하게 되는 물의 양을 연령별로 측정하여 노출량을 산정하는 Gamma 분포 모델이 개발되어,¹⁷⁾ 이를 적용할 수 있다. 수영을 할 때와 분수 등의 수경시설에서 물놀이를 할 때, 물의 음용 과정에 관련된 차이점은, 물이 몸 전체에 또는 일부분에만 접촉하는 가, 물을 마시는 경우가 의도적인가 또는 다른 동작을 하는 중 부수적으로 음용하게 되는가의 차이이다. 따라서, 수영을 할 때의 물 음용량을 수경시설을 이용할 때 음용하게 되는 양을 수경시설 이용시 음용하는 양의 최대로 평가하고, 음용량 모델을 적용하였다. Schets *et al.*¹⁷⁾의 결과에 따르면, 15세 이하의 어린이들이 1회 수영 중 마시는 양이 어른 보다 더 많았다. 본 연구는 어린이에 대한 위해도 평가를 목적으로 하므로, 15세 이하 이용자가 수영장에서 음용하는 물의 부피를 fitting 한 모델, 즉, 평균 51 ml, 95% 신뢰구간 0.62-200 ml를 갖는 Gamma(0.81,63)의 확률분포를, 수경시설에서 물놀이를 하면서 어린이들이 음용하게 되는 물의

부피로 선정하였다. 이 양을 에어로졸로 마시는 양과 비교하면, 에어로졸의 양은 평균 음용량의 0.4% 정도에 불과하므로, 노출량 산정법을 단순하게 하기 위하여, 에어로졸 형태로 구강에 들어와 음용하게 되는 양은 음용량에 반영하지 않기로 하였다. 이렇게 노출경로를 음용으로 단순화한 노출량 평가는, 실제 노출량을 다소 과소평가할 가능성이 있지만, 음용량 자체의 불확실성과 변이도에 비하며 미미한 수준의 오차이다. 최종적으로 본 연구에 사용된 노출평가 방법은 노출량을 대장균의 농도와 15세 이하 어린이가 1회 수영할 때 마시는 물의 부피를 곱하여 산정하는 것이었다.

3. 용량-반응 모델의 적용

통상적인 수질 조사에서 검출되는 대장균의 농도로 노출량을 산정하고, 대장균의 용량-반응 모델을 활용하여 수경시설의 미생물학적 위해도를 산정하는 과정은 두 가지 불확실성(uncertainty)을 해결하여야 한다. 첫째는 용량-반응 모델은 감염대상에 대한 병원성이 일정한 각각의 병원체 균주에 대해 만들어 지지만, 수질검사 항목 중 대장균 수는 다양한 대장균 균주들을 모두 포함한다는 점이다. 둘째로, 동일한 대장균 균주가 감염대상의 연령에 따라 정도가 상이한 발병률을 나타내는데(서론 참조), 어린이들이 주로 수경시설에서 물놀이를 하는 대상이라는 점에서, 감염대상의 연령별로 용량-반응 관계가 다르다는 점이다. 본 연구는 문헌에서 알려진 *Escherichia coli*의 용량-반응 모델을 탐색하고, 각 모델을 결정하는데 사용된 균주와 감염 대상을 면밀히 검토하여, 국내 수경시설 수질오염 및 이용자의 특성과의 차이점을 분석하고, 수경시설에 대비하여, 위해도의 범위를 해석하였다.

대부분의 대장균 용량-반응 평가가 동물 또는 성인 자원자를 대상으로 한 점 때문에, 어린이가 수경시설 용수의 대장균에 노출됨에 따른 위해성을 평가하고자 하는 본 연구의 용량-반응 모델로 적합하지 않았다. 어린이를 대상으로 결정된 용량-반응 모델은 1996년 일본의 모리오카 시의 한 초등학교에서 발생한 대장균 집단식중독 발병의 역학자료에서 얻어진 beta-Poisson 모델들이 대표적이다.^{18,19)} 828명에 이르는 많은 수의 어린이가 음식을 통해 *Escherichia coli* O157:H7에 노출된 경우로, 모든 음식에 고병원

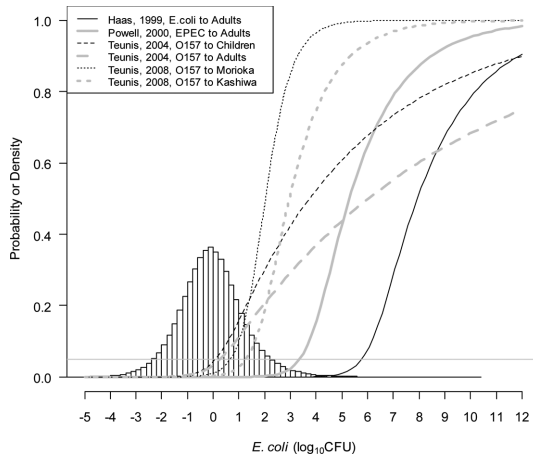


Fig. 1. Dose-response curves for probability of *E. coli* infection and histograms for relative frequency of exposure rates to *E. coli* in fountain waters.

성의 enterohemorrhagic *E. coli* O157:H7(EHEC)가 균질하게 분포한다는 가정하에서 노출량을 정하고 반응관계를 fitting하여 설정된 용량-반응 모델¹⁸⁾과, 불균질하게 분포한다는 가정에서 노출량을 산정하여 fitting된 모델,¹⁹⁾ 두 가지가 제안되었다(Fig. 1). 다른 어린이 집단식중독 기반 모델로, 1997년 일본 가시와 시의 탁아소에서 발생하여, 71명의 어린이가 위주로 구성된 탁아소 집단을 EHEC가 감염시킨 경우를 들 수 있다.¹⁹⁾ 이 모델도 감염원인 멜론에 EHEC가 불균질하게 분포한다는 가정을 적용한 경우이다.

모리오카와 가시와 시의 어린이 집단식중독의 역학자료에 근거한 모델들은 국내 수경시설 물놀이 집단과 연령과 인종 면에서 상당히 유사한 집단을 기반으로 만들어 졌으므로, 감염 대상의 연령 등에 의한 반응의 불확실성은 상당히 제거된 상태로 적용할 수 있는 모델들이다. 그러나 어떤 종류의 대장균이

병원체인가에 대한 불확실성은 여전히 가지고 있다. 이 단점을 보완하기 위해, EHEC가 아닌 대장균을 대상으로 만들어진 용량-반응 모델들을 추가로 고려하였다. EHEC가 아닌 대장균의 종류로, 뚜렷한 병원성이 없는 균주들, 그리고, enteropathogenic *E. coli* (EPEC), enteroinvasive *E. coli* (EIEC), enterotoxigenic *E. coli* (ETEC) 등, EHEC에 비하여 상대적으로 저병원성인 대장균 종류들이 있다. Haas *et al.*²⁰⁾은 총 109명의 건강한 성인을 대상으로 EPEC, EIEC, ETEC를 각각 복용한 4개의 연구결과를 pooling하여 얻은 beta-Poisson 모델을 제시 하였는데, 본 연구는 이를 다양한 병원성 대장균의 성인에 대한 용량-반응을 표현하는 모델로 참조하였다(Fig. 1). Powell *et al.*²¹⁾은 EPEC와 *Shigella dysenteriae*를 성인에게 실험적으로 감염시킨 결과에 기초하여 beta-Poisson 모델을 제시하였는데(Fig. 1), 본 연구에서 EHEC 이외에 비교적 높은 병원성을 보이는 대장균 균주에 성인이 노출된 후 보이는 반응의 예로 참조하였다. 사용된 총 6개의 용량-반응 모델의 변수들은 Table 1에 기술하였다. 본 연구에서 사용된 beta-Poisson 모델의 수식은 Haas *et al.*²⁰⁾에 따라, 대장균 감염증상이 나타날 확률을 p_i , 대장균에 대한 노출량을 E 라 할 때, $p_i = 1 - (1 + E/\beta)^{-\alpha}$ 의 관계로 감염확률을 구하였다.

4. 통계적 분석

본 연구에서 사용된 모든 통계적 분석은 통계적 프로그래밍 환경인 R을 사용하여 진행되었다²²⁾. 대장균수의 단변수 분포와 모델 fitting 및 Monte Carlo simulation에는 stat, fitdistplus, mc2d package를 사용하였다.²³⁾ 통계적 유의수준은 별도의 언급이 없는 한 5% type I error로 적용하였다.

Table 1. Parameters of beta-Poisson dose-response models for *E. coli* infection

Source	Pathogen	Subjects	α	β
Haas, 1999 ²⁰⁾	EPEC, EIEC, ETEC	Adults	0.1778	1,779,554.450
Powell <i>et al.</i> , 2000 ²¹⁾	EPEC/ <i>Shigella</i>	Adults	0.2200	8,700.000
Teunis <i>et al.</i> , 2004 ¹⁸⁾	STEC O157	Morioka children	0.0840	1.440
Teunis <i>et al.</i> , 2004 ¹⁸⁾	STEC O157	Morioka adults	0.0500	1.001
Teunis <i>et al.</i> , 2008 ¹⁹⁾	STEC O157	Morioka	0.6510	56.550
Teunis <i>et al.</i> , 2008 ¹⁹⁾	STEC O157	Kashiwa children	0.3020	103.000

III. 연구 결과

1. 대장균의 분포

서울 시내 어린이공원 22개소¹⁰⁾와 환경부가 조사한 전국 18개소¹⁾의 수질조사에서 대장균이 검출되었다. 전자의 자료는 서울시 18개 구에 소재한 어린이공원 22개소의 바닥분수와 폭포 등 물놀이용 수경시설을 대상으로 수질을 조사하였는데, 17개소에서 100 ml 당 ~1,600 CFU개의 대장균이 검출되었다. 후자의 조사는, 조사 대상 중 8개소에서 100 ml 당 20 CFU 이하의 대장균을 검출하였고, 1개소에서 300 CFU를 초과하는 대장균이 검출하였다.

전라북도 자체 조사의 결과에서는 대장균은 모든 용수에서 검출되지 않았다.¹⁴⁾ 단 한 곳의 수경시설의 용수 탁도가 환경부 수질관리 지침을 다소 초과하였을 뿐, 전라북도의 보고서는 앞서의 2건의 보고서에서 조사된 대상들과 다른 항목에서도 상당히 다른 수질을 보고하였다. 따라서, 조사 대상의 조건과 조사 방법이 앞서 기술한 2건의 다른 보고와 상당히 다른 것으로 사료되고, 또한 조사 전수에서 대장균 불검출로 위해도 측정이 불가능한 자료이므로, 본 연구의 노출량과 위해도 산정을 위한 분석 대상 자료에서 제외하였다.

본 연구는 대장균이 검출된 위의 두 조사 자료 중 대장균수 항목을 pooling하고, 전체 대장균수의 단변수 분포를 추정하여, 물놀이용 수경시설의 용수 내 대장균의 분포를 기술하는 모델을 결정하였다. 전체 40개소 중 25개소에서 대장균이 검출되었고, 시료

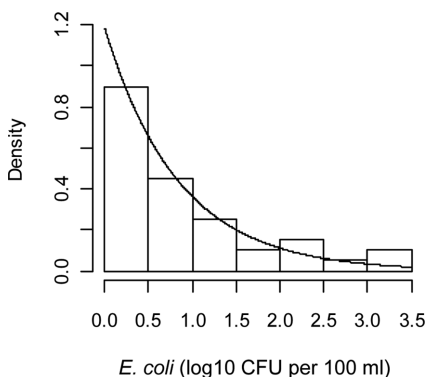


Fig. 2. Frequency distribution of *E. coli* abundance observed in waters of interactive waterscape facilities in Korea (histogram: observed frequency, curve: fitted exponential curve).

별 대장균 수는 불검출의 경우가 15개소로 가장 많은 도수를 보였으며, 대장균수의 증가에 따라 도수가 빠르게 감소하는 경향을 보였으나, 매우 높은 산포도로 불연속 구간이 많고 넓은 도수분포를 보였다. Log transformation을 실시하였을 때, 연속적인 도수분포가 관찰되었다(Fig. 2). Poisson, Cauchy, Gamma, Logistic, Exponential 분포에 fitting 하였을 때, 한 Exponential 분포가 Loglikelihood -33.2의 값으로 가장 좋은 fit을 보였다. 이 과정에서 결정된 대장균의 상대도수 d 는, transformation된 대장균 수 $x = \log_{10}(1 + E. coli \text{ CFU per } 100 \text{ ml})$ 일 때, $d(x) = 1.18 e^{-1.18x}$ 의 지수분포로 결정되었다.

2. 노출량 평가

수경시설에서 물놀이를 하는 이용자가 대장균에 노출되는 양(E)은 용수 속 대장균의 농도(h)와 음용한 부피(v)를 곱하여 얻을 수 있다. 노출량은 h 와 v 값을 Monte Carlo simulation에 의해 결정하고 곱하여 산정하였다. 즉, $E = hv$ 로 산정하였다. 이때, h 는 Exponential(1.18)의 어느 한 값 y 를 뽑은 후, $h = 10^y - 1$ 로 구하였다. v 는 어린이들이 1회 수영시 음용하는 물의 부피의 분포인 Gamma(0.81,63)에서 한 값으로 설정하였다.¹⁷⁾ 백만 개의 E 값을 simulation했을 때, Fig. 1의 히스토그램에 표현된 상대도수분포를 보였다. 노출량은 $\sim 1.9 \times 10^{10}$ CFU의 범위를 보이며, 8.6×10^4 CFU의 평균값과 0.8 CFU의 중앙값을 중심으로, 오른쪽으로 치우치는 약간의 왜도가 있었고, 첨도가 정규분포보다 높았다. 이 분포는 정규, Poisson, Cauchy, Gamma 분포 등에 fitting되지 않았다. Logistic 분포에 가장 근접하였지만, Kolmogorov-Smirnov test에 의해 fitness는 기각되었다 ($p < 0.05$). 수질관리 지침에 따라 수경시설 용수의 대장균 수를 200 CFU per 100 ml 이하로 유지할 경우 발생하는 노출량을 simulation하였을 때, $\sim 1,172$ CFU의 범위를 보이고, 0.6 CFU의 평균값과 0.7 CFU의 중앙값을 보였다.

노출량은 Exponential 분포의 대장균 농도(h)와 Gamma 분포의 음용한 부피(v)에 의해 결정되는 데, 두 변수 중 어느 것에 더 큰 영향을 받는 지 알기 위해 1,000개의 h , v , E 값을 생성하여 h 와 v 에 따른 E 의 변화를 관찰하였다(Fig. 3). 음용량 보다는 대장균 농도가 노출량을 결정하는 데 훨씬 더 큰 영

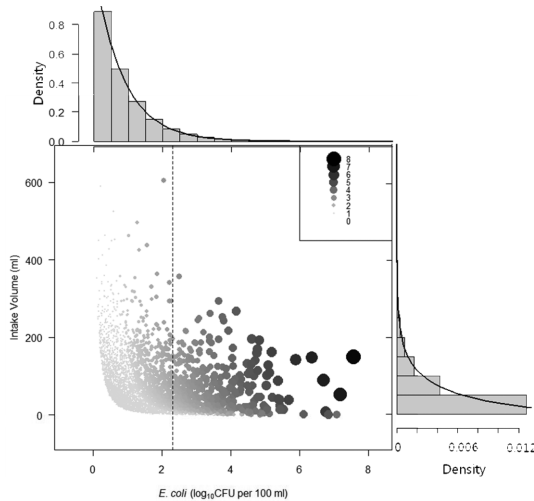


Fig. 3. Dependence of exposure rates to intake volume and *E. coli* abundance (circles = 1,000 exposure rates in the unit of \log_{10} CFU, histogram on the top = relative frequency of *E. coli* abundance, histogram to the right = relative frequency of intake volume).

향을 주는 것으로 나타났다. 이는 log transformation이 필요함에서 볼 수 있듯이, 대장균 농도의 산포도가 기하급수적으로 결정되기 때문으로 사료된다.

3. 위험도 산출

EHEC가 불균질하게 분포하는 음식을 섭취한 어린이가 발병할 위험도를 기술한 Teunis *et al.*¹⁹⁾의 모델들은 수십 CFU의 노출에 0.1 이상의 발병률을 보이고 100 CFU 이상의 노출에 0.5 정도의 위험도를 보이는 등, 전반적으로 매우 높은 위험도를 보였다. 국내에서 아직 물놀이에 의한 EHEC의 집단감염의 사례가 없으므로, E 값들을 이들 불균질분포 모델들에 적용할 경우, 위험도를 지나치게 높게 평가한다고 사료되었다. 또한, 용수는 음식에 비하여 구성물 균질도가 높으므로, Tenunis *et al.*¹⁸⁾의 균질모델이 수경시설 용수의 위험도 평가에 더 적합한 것으로 평가되었다. 어린이와 성인에 대하여 별도로 산정된 균질 모델들은 1 CFU 이상에서부터 위험도가 나타나며, 노출량 증가에 따른 위험도의 증가가 비교적 소량이었다(Fig. 1). Tenunis *et al.*¹⁸⁾의 어린이에 대한 균질 모델은, 가장 병원성이 높은 대장균이 가장 저항성이 낮은 초등학교 어린이 연령의 집단 감염에

서 도출된 모델이므로, 병원성의 정도가 다양한 수경시설 용수에 노출된 어린이가 가질 최대 위험도로 평가된다. Tenunis *et al.*¹⁸⁾의 성인에 대한 모델은, 고병원성 EHEC에 대하여 성인집단이 저항성을 가짐을 보였다.

Haas *et al.*²⁰⁾과 Powell *et al.*²¹⁾의 모델들은, EHEC보다 병원성이 낮은 대장균에 건강한 성인이 노출된 경우로, 동일한 대장균에 어린이가 노출된 경우의 위험도의 최소값으로 참조하였다. 두 모델을 적용할 때, 수경시설의 용수에서 관찰되는 전체 대장균에 대한 노출량(*E*)으로 인한 위험도는 거의 없었다(Fig. 1). 일례로, E값의 95번째와 99번째 백분위수에 해당하는 Powell의 모델의 위험도는 각각 0.003과 0.062에 불과하였다. 따라서, 수경시설 용수의 대장균이 EHEC를 포함하지 않는 한, 성인 정도의 감염저항성을 가진 어린이에게 대장균 감염 위험도는 거의

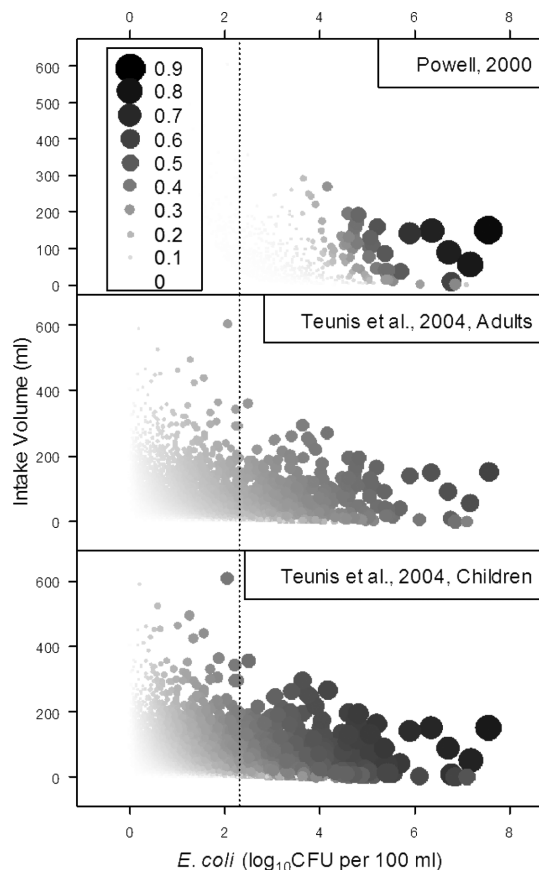


Fig. 4. Risk of infection by *E. coli* based on three dose-response models (circles = probability of infection).

없는 것으로 평가되었다. 그러나 어린이들은 성인에 비하여 저항성이 낮으므로, 이 두 모델에 근거하여 수경시설 대장균의 감염 위험도가 없다고 결론 지을 수 없었다. Teunis의 어린이에 대한 균질모델을 적용한 결과와 함께 고려하면, 국내에서 발견되는 수경시설 물놀이 용수의 대장균에 대한 노출은 어린이에게 감염 위험도를 가지며, 그 정도는 용수에 포함된 대장균의 종류에 따라 달라진다고 볼 수 있었다.

위험도가 대장균 농도(h)와 음용한 부피(v) 중 어느 것에 더 큰 영향을 받는 지 알기 위해, 각 모델에 대해 1,000개의 위험도 값을 생성하여 h 와 v 에 따른 위험도의 변화를 관찰하였다(Fig. 4). 음용량 보다 대장균 농도가 위험도를 결정하는 데 훨씬 큰 영향을 주는 것으로 나타났다. 200 ml 이상의 용수를 음용할 때 위험도의 큰 증가는 없었으며, 용수 중 대장균 농도에 따라 급격한 변화를 보였다.

IV. 고 찰

1. 수경시설 물놀이에 의한 어린이 감염의 위험도

본 연구의 결과, 수경시설에서 어린이가 물놀이를 할 경우 노출되는 대장균이 어떤 종류인지에 따라 발병 가능성이 있었다. 대장균에 대한 노출량을 산정할 때, 네덜란드의 15세 이하 어린이들이 수영장에서 물놀이를 할 때 음용하는 물의 부피의 분포를 적용하였기 때문에, 한국 어린이들과 네덜란드 어린이들의 신체 및 행동양식의 차이가 있을 수 있다는 점과 수경시설이 아니라 수영장의 경우에 측정이 이루어졌다는 점에서, 노출량이 실제보다 높게 측정되었을 가능성이 있다. 본 연구에서는, 산정된 노출량을 한국 어린이들에게서 나타날 수 있는 최대 노출량이라 산정하고 결과를 해석하였다. 따라서, 본 연구에서 산정된 위험도는 대장균 감염 위험도를 상당히 민감하게 측정하는 노출량 모델에 의한 위험도 값이라 볼 수 있다. 이러한 점을 고려하면서 본 연구의 결과를 해석하면, 한국 어린이들이 수경시설에서 물놀이를 한다면 병원성이 높은 대장균 종류에 대해 감염 위험도가 존재한다고 볼 수 있다. 고병원성인 EHEC가 존재할 경우, 어린이들이 발병할 위험도는 충분히 있다. 어린이에 대한 Teunis 균질 모델의 경우, simulation한 위험도의 75, 95, 99번째 백분위수가 각각 0.12, 0.32, 0.47로, 상당한 위험도가

존재하는 것으로 산정되었다(Fig. 1, 4). Teunis 균질 모델에 의한 위험도는 일종의 최대값으로 생각할 수 있고, EHEC 이외의 대장균에 대해서는, 용수가 어떤 종류의 대장균에 오염되었는지에 따라, 그 보다 낮은 위험도가 예상된다. Powell의 모델에 따른 위험도는 EPEC와 *S. dysenteriae*에 의한 성인 감염의 경우로, 비교적 병원성이 높은 대장균에 의해 어린이가 감염될 위험도의 최소값이다. Haas의 모델 또한, 일반적인 다양한 병원성 대장균이 어린이에게 보일 수 있는 최소 위험도를 기술한다고 볼 수 있다. 결론적으로, 수경시설에 물놀이하는 어린이들이 대장균 오염이 심한 용수에서 물놀이 할 경우 소화기 질환을 겪을 위험도가 있다고 볼 수 있다. 위험도의 정도는 어떤 정도의 병원성을 가진 대장균 균주가 용수에 오염되었는지에 의해 결정될 것이다.

2. 현행 수질관리 지침의 효용성

현행 환경부 수경시설 수질관리 지침은 100 m³/당 200 CFU 미만의 기준을 두고 있는 데, 이 기준이 대장균 감염 위험성을 얼마나 저감하는지를 고찰하였다. 용수의 대장균 농도 h 를 200 CFU per 100 ml로 한정하였을 때, simulation에 의한 노출량 E 는 $\leq 1,172$ CFU를 보였다. E 에 기초하여 여러 반응-용량 모델로 위험도를 산정해 본 결과 Powell의 모델은 <0.03 , Teunis의 어린이에 대한 균질 모델은 <0.43 의 위험도를 보였다. 수질기준이 초과되도록 하였을 때, 두 모델은 각각 최대 0.95와 0.85의 위험도를 보인 점(Fig. 4 참조)과 대비하면, 현행 수질기준의 대장균 항목은 저병원성 대장균에 대하여 효과적으로 위험도를 제거하며, EHEC 같은 고병원성 대장균주에 대한 위험도를 상당히 저감한다고 볼 수 있다. Teunis의 어린이에 대한 균질 모델에 의한 위험도 분포에서 중앙값이 0.03, 99번째 백분위수가 0.30으로 측정된 점을 고려하면, 현행 수질 기준은 고병원성 대장균에 의한 위험도가 <0.3 정도의 수준으로 통제가 되도록 한다고 볼 수 있다.

3. 수경시설 효율적 관리 방향

노출량과 위험도 모두에서, 용수 음용량 보다 용수 중 대장균 수가 주요 결정인자 인 것으로 나타났다(Fig. 3, 4). 따라서, 어린이들이 용수를 음용하는 행위를 하지 않도록 지도하는 활동보다 용수의

수질관리가 더 주요한 위해도 저감법이 될 것이다. 어린이들은 물놀이 시설에서 감독자의 유무에 관계 없이 용수를 음용한다는 관찰결과¹¹⁾는 수질관리가 이용객 행동지도에 비해 훨씬 효용성이 있다는 점을 뒷받침한다. EHEC 이외의 대장균 균주의 어린이에 대한 용량-반응 모델이 알려져 있지 않아 용수에 흔히 유입될 수 있는 대장균 종류에 대한 위해도 평가가 현재의 자료만으로는 불가능하지만, 발생 가능한 최대 위험도의 지표로 Teunis의 어린이에 대한 균질 모델을 적용한 위해도를 산정할 수 있다. 위해도를 0.05 미만이면 통제 하고자 한다면, EHEC에 대한 노출을 <1.2 CFU로 유지하여야 하므로, 어린이들의 평균 음용량이 51 m³를 고려할 때, 용수의 EHEC 농도를 평균적으로 100 m³/당 2.4 CFU 이하로 관리하여야 한다. 나아가, 어린이가 음용하는 부피가 Gamma 분포의 산포도를 갖는다는 점을 고려하면, EHEC의 불검출을 기준으로 설정하여야 할 것이다. EHEC 이외의 대장균에 대하여 더 완화된 기준을 적용할 수 있지만, 이들 대장균의 어린이에 대한 용량-반응 모델이 조사되지 않아, 가용한 대장균 기준을 적시하기 어렵다. 하지만, Powell 모델에 따르면, 성인의 경우 현행 기준이 위해도를 통제할 수 있는 것으로 나타나므로, 어린이의 경우 다소 더 엄격한 기준에 의해 위해도가 통제될 수 있을 것으로 사료된다. 이를 위한 정확한 기준 설정을 위해서는, EHEC가 아닌 대장균의 어린이에 대한 용량-반응 관계에 대한 연구가 더 필요하다.

V. 결 론

국내 물놀이용 수경시설의 용수에 포함된 대장균의 수는 최고 100 m³/당 1,600 CFU까지 관찰되었으며, 로그를 취하면 Exponential 분포를 보였다. 수영장장에서 수영활동 중 어린이들이 마시는 물의 양을 Gamma 분포로 적용하여 계산된 어린이의 대장균 노출량은 $\sim 1.9 \times 10^{10}$ CFU의 범위에서 0.8 CFU의 중앙값을 보이며 높은 산포도를 보였다. 고병원성인 EHEC가 어린이에게 노출된 경우를 위해도의 최대 값으로 설정하면, 이 노출량은 0.85의 높은 위해도를 나타낼 수도 있는 것으로 산정되었다. EPEC 등 다른 대장균 균주들의 위해도는 성인에 대해서만 산정이 가능했는데, 계산된 노출량에 따라 최대 0.95

의 높은 위해도를 나타낼 수 있었다. 위해도는 이용자가 음용하는 용수의 부피 보다는 용수 중 대장균의 농도에 더 민감하게 변화하였다. 따라서, 수질관리가 이용객 행동지도 보다 더 효과적인 위해도 저감법으로 제시되었다.

수경시설의 수질을 현행 수질관리 지침에 따라 100 m³/당 <200 CFU 이하로 관리할 경우, 노출량은 1,172 CFU 이하로 낮아지며, 노출되는 대장균이 EHEC인 경우, 어린이에 가해지는 위해도는 <0.43를 보였다. 한편, 성인이 EPEC 등 병원성이 상대적으로 낮은 대장균에 노출될 경우에 평가되는 위해도는 0.03 이하로, 현행 지침에 따른 수질관리에 의해 감염 위해도가 거의 제거되는 것으로 나타났다. 그러나, 어린이가 이들 EPEC 등의 대장균에 대해 노출될 경우는 성인에 비해 높은 위해도를 보일 것이므로, 현행 지침에 따라 관리가 되어도 어린이에 대한 대장균 감염의 위해성이 존재한다고 보아야 할 것이다. 어린이에 대한 위해도가 얼마인지 정량하기 위해서는 어린이들이 여러 종류들의 대장균 균주들 각각에 노출된 용량-반응 모델이 개발되어야 한다.

감사의 글

본 연구는 2010학년도 경성대학교 부설연구소 연구지원사업으로 이루어졌음.

참고문헌

1. Ministry of Environment Korea. Study on Measures for Management of Water Quality in Waterscape Facilities: Ministry of Environment, Korea; 2010.
2. Kim I-H, Heo H-C, Huh K-Y. Evaluating user's behavior and satisfaction on pop-jet fountain of Namgaram Park in Jinju. *Journal of Korean Society for People, Plants and Environment*. 2009; 12(3): 53-67.
3. Centers for Disease Control and Prevention. Outbreak of cryptosporidiosis associated with a water sprinkler fountain--Minnesota, 1997. *MMWR Morb Mortal Wkly Rep*. 1998; 47(40): 856-860.
4. Centers for Disease Control and Prevention. Outbreak of gastroenteritis associated with an interactive water fountain at a beachside park--Florida, 1999. *MMWR Morb Mortal Wkly Rep*. 2000;

- 49(25): 565-568.
5. Centers for Disease Control and Prevention. Cryptosporidiosis outbreaks associated with recreational water use-five states, 2006. *MMWR Morb Mortal Wkly Rep.* 2007; 56(29): 729-732.
 6. Centers for Disease Control and Prevention. Outbreak of cryptosporidiosis associated with a splash park - Idaho, 2007. *MMWR Morb Mortal Wkly Rep.* 2009; 58(22): 615-618.
 7. Bancroft JE, Keifer SB, Keene WE. Shigellosis from an interactive fountain: implications for regulation. *J Environ Health.* 2010; 73(4): 16-20.
 8. Eisenstein L, Bodager D, Ginzl D. Outbreak of giardiasis and cryptosporidiosis associated with a neighborhood interactive water fountain--Florida, 2006. *J Environ Health.* 2008; 71(3): 18-22; quiz 49-50.
 9. Ministry of Environment Korea. Guideline for Management of Water Quality in Interactive Waterscape Facilities; 2010.
 10. Korean Association for Safe Communities. Press Release: 8 times more *E. coli* than the standard found among pop-jet fountains in children parks in Seoul; 2011.
 11. Nett RJ, Toblin R, Sheehan A, Huang WT, Baughman A, Carter K. Nonhygienic behavior, knowledge, and attitudes among interactive splash park visitors. *J Environ Health.* 2010; 73(4): 8-14.
 12. Delignette-Muller ML, Cornu M. Quantitative risk assessment for *Escherichia coli* O157:H7 in frozen ground beef patties consumed by young children in French households. *Int J Food Microbiol.* 2008; 128(1): 158-164.
 13. Wade TJ, Calderon RL, Brenner KP, Sams E, Beach M, Haugland R, et al. High sensitivity of children to swimming-associated gastrointestinal illness: results using a rapid assay of recreational water quality. *Epidemiology.* 2008; 19(3): 375-383.
 14. Song J-H, Chae S-C, Kang B-I, Yu D-C, Jeong S-D, Lee M-S, et al. A Survey of Water Quality of the Swimming Pool Fountains in Jeollabuk-do. Division of Water Research Jeollabukdo Institute of Health and Environmental Research; 2010.
 15. Lee SD. A study on predicting the range of cooling effect and the diffusion of water particles that are generated from a fountain. *Journal of the Environmental Sciences.* 2011; 20(7): 819-828.
 16. Zhou Y, Benson JM, Irvin C, Irshad H, Cheng Y-S. Particle size distribution and inhalation dose of shower water under selected operating conditions. *Inhal Toxicol.* 2007; 19(4): 333-342.
 17. Schets FM, Schijven JF, de Roda Husman AM. Exposure assessment for swimmers in bathing waters and swimming pools. *Water Res.* 2011; 45(7): 2392-2400.
 18. Teunis P, Takumi K, Shinagawa K. Dose response for infection by *Escherichia coli* O157:H7 from outbreak data. *Risk Anal.* 2004; 24(2): 401-407.
 19. Teunis PF, Ogden ID, Strachan NJ. Hierarchical dose response of *E. coli* O157:H7 from human outbreaks incorporating heterogeneity in exposure. *Epidemiol Infect.* 2008; 136(6): 761-770.
 20. Haas CN, Rose C, Gerba CP. Quantitative Microbial Risk Assessment. New York, N. Y.: John Wiley and Sons, Inc.; 1999.
 21. Powell MR, Ebel E, Schlosser W, Walderhaug M, Kause J. Dose-response envelope for *Escherichia coli* O157:H7. *Quantitative Microbiol.* 2000; 2(2): 141-163.
 22. R Development Core Team. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing; 2011.
 23. Delignette-Muller ML, Pouillot R, Denis J-B, Dutang C. fitdistrplus: help to fit of a parametric distribution to non-censored or censored data. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing; 2010.