

우리나라 먹는물의 크립토스포리디움에 의한 건강위해도 평가 연구

이목영[†] · 박상정* · 조은주** · 박수정* · 한선희** · 권오상*
서울시 보건환경연구원, *국립환경과학원, **서울시 상수도연구원

Health Risk Assessment of *Cryptosporidium* in Tap Water in Korea

Mok-Young Lee[†], Sang-Jung Park*, Eun-Joo Cho**, Su-Jeong Park*,
Sun-Hee Han**, and Oh-Sang Kwon*

Seoul Metropolitan Government Research Institute of Public Health and Environment
*National Institute of Environmental Research
**Seoul Metropolitan Government Waterworks Research Institute

ABSTRACT

Objectives: *Cryptosporidium*, a protozoan parasite, has been recognized as a frequent cause of waterborne disease due to its extremely strong resistance against chlorine disinfection. Although there has as yet been no report of a *Cryptosporidium* outbreak through drinking water in Korea, it is important to estimate the health risk of *Cryptosporidium* in water supply systems because of the various infection cases in human and domestic animals and frequent detection reports on their oocysts in water environments.

Methods: This study evaluated the annual infection risk of *Cryptosporidium* in tap water using the quantitative microbial risk assessment technique. Exposure assessment was performed upon the results of a national survey on *Cryptosporidium* on the water sources of 97 large-scale water purification plants in Korea, water treatment efficacy, and daily unboiled tap water consumption. The estimates of the US Environmental Protection Agency on the mean likelihood of infection from ingesting one oocyst were applied for effect assessment.

Results: Using probabilistic methods, mean annual infection risk of Cryptosporidiosis by the intake of tap water was estimated to fall within the range of 2.3×10^{-4} to 1.0×10^{-3} (median 5.7×10^{-4}). The risk in using river sources was predicted to be four times higher than with lake sources. With 0.5-log higher removal efficacy, the risk was estimated to be 1.8×10^{-4} , and could then be lowered by one-third.

Conclusions: These estimations can be compared with acceptable risk and then used to determine the adequacy and priority of various drinking water quality strategies such as the establishment of new treatment technology.

Keywords: *Cryptosporidium*, oocysts, drinking water supplies, health risk, quantitative microbial risk assessments

I. 서 론

크립토스포리디움(*Cryptosporidium*)은 설사증을 일으키는 기생성 원충의 일종으로써, 90년대 이후 미국, 영국, 일본 등에서 가장 대표적인 수인성 집단

질병 발생원인이 되고 있는 병원체이다. Apicomplexa, Cryptosporidiidae에 속하는 크립토스포리디움은 장상피세포의 미세융모에 부착하여 설사나 복통을 일으키는 세포내 절대기생체로써, 복잡한 생활사(life cycle) 중 유성생식단계를 거쳐 분변과 함께 체외로

[†]Corresponding author: Seoul Metropolitan Government Research Institute of Public Health and Environment, Seoul 420-070, Korea, Tel: +82-2-570-3375, Fax: +82-2-570-3475, E-mail: mylee9@seoul.go.kr

Received: 3 Decembe 2012, Revised: 7 January 2013, Accepted: 20 February 2013

배출되는 난포낭(oocysts)이 감염성을 갖는다.¹⁾

크립토스포리디움에 의한 인체 감염은 주로 사람 간 접촉, 사람-동물간 접촉 등에 의해 매개되지만, 감염환자나 가축이 배출한 난포낭에 의해 먹는물이 오염되어 집단감염으로 대규모화하기도 한다. 특히 20세기에 수인성 감염경로가 문제가 되었던 것은 크립토스포리디움 난포낭이 직경 4-6 μm 의 비교적 작은 크기로 인해 침전, 여과 등의 물리적 정수처리공정에서 충분히 제거되지 않을 뿐만 아니라, 소독제로 사용되고 있는 염소에 극도로 강한 저항성을 갖기 때문이다. 수온 25°C, pH 7.0의 조건에서 염소농도 80 mg/L에 90분 이상 노출되어야만 99%의 난포낭이 불활성화되며,²⁾ 수온 5°C, pH 7.0에서 크립토스포리디움 1log 불활성화에 필요한 CT 값이 1,250 mg·min/L이라는 연구결과도 있었다.³⁾ 또한 몇 개의 난포낭 섭취로도 감염을 일으킬 수 있는 높은 감염력, 사람, 소 등의 다양한 배출원, 체내 자가감염(autoinfection cycle)으로 인한 과량의 난포낭 배출 등도 다른 수인성 병원체와 구별되는 특징이다.

한편 정량적 미생물위해도평가(Quantitative Microbial Risk Assessment, QMRA)는 어떤 특정 병원성 미생물에 오염된 식품이나 물 등을 섭취하는 경우, 그 병원성 미생물에 의해 감염 또는 질병이 일어날 확률, 즉 위험도(Risk)를 정량적으로 평가하는 것을 말한다. QMRA는 병원성 미생물의 오염과 증식, 사멸 등에 내재된 많은 변이성(variability)과 불확실성(uncertainty)을 고려하여 병원성 미생물에 의해 감염이 일어날 확률을 과학적으로 평가하므로, 최근 식품안전평가분야에서 국제적으로 가장 과학적인 차세대 기술로 인정되어 활용되고 있다.⁴⁾ 또한 먹는물 분야에서도 미국^{5,6)}, 캐나다, 네덜란드⁷⁾ 등 각국에서 수질관련 법규 제정이나 정수장별 수질목표 설정, 처리공정 평가 등에 다양하게 적용되고 있다.

그러나 우리나라에서는 이제까지 먹는물의 미생물에 의한 건강위해도를 산출하여 보고한 사례가 없었는데, 이는 평가의 네가지 단계에 필수적인 많은 정보들 즉 해당 미생물의 유해특성자료, 노출데이터, 최소감염량 등이 뒷받침되지 않았기 때문이다.⁸⁾ 다른 한편으로는 그동안 상수처리의 주된 관리목표였던 살모넬라(*Salmonella*), 시겔라(*Shigella*) 등의 병원성 세균이 염소소독만으로도 쉽게 사멸, 제어되기

때문에 수돗물에 의한 건강위해도를 구체적으로 산출할 필요성을 크게 느끼지 못한 때문이기도 하다.

하지만 크립토스포리디움은 염소소독으로 불활성화되기 어렵고 한 개의 난포낭에 의한 감염확률이 4~16%의 범위로 매우 높기 때문에,⁶⁾ 최종 상수처리수의 크립토스포리디움 농도가 극도로 낮은 수준으로 제어되어야 한다. 경우에 따라 오존이나 자외선 소독과 같은 새로운 처리공정을 도입하거나 취수원을 변경하는 등 대규모 투자가 필요한 대책을 수립해야 하므로, 이러한 대책 수립 및 투자 규모 결정에 앞서 현재 수준에서 크립토스포리디움에 의한 건강위해도를 과학적으로 추정하는 일은 무엇보다 중요해진다.

이에 본 연구에서는 우리나라 대규모 정수장 상수원수의 크립토스포리디움 분포실태에 대한 자료와 외국의 먹는물 음용량 자료, 크립토스포리디움 최소감염량 등에 관한 선행연구 결과 등에 기초하여, 수돗물의 크립토스포리디움에 의한 건강위해도를 추정하였다. 특히 본 연구에서는 각 변수자료가 가질 수밖에 없는 불확실성(Uncertainty)과 변이성(Variability)을 고려하여 확률론적 방법(Probabilistic approach)을 사용하였다. 이렇게 추정된 위해도는 사회적으로 합의된 수질목표 즉 '허용가능한 수준(Acceptable Risk)'과의 비교를 통해 정수처리공정 개선이나 새로운 정수기술 도입, 취수원수 변경, 먹는물 수질기준 설정 등의 위해도관리(Risk management)에 활용될 수 있을 것이다.

II. 연구방법

위해도평가는 기본적으로 4가지 단계 즉 유해 확인(Hazard Identification), 노출평가(Exposure Assessment), 용량반응평가(Dose-Response Assessment) 및 위험도 특성분석(Risk Characterization)으로 이루어진다.⁸⁾ 본 연구에서는 우선적으로 우리나라 사람과 가축에서의 크립토스포리디움 감염사례 및 수질환경 오염 사례를 수집하여 유해성여부를 확인한 후, [Fig. 1]과 같은 개괄적인 평가절차에 따라 수돗물의 크립토스포리디움에 의한 건강위해도를 추정하였다.

최종 건강영향 즉 건강위해도(Annual Risk, AR)는 연간감염확률로 평가하였으며, 이를 계산하는 식은 간단하게 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

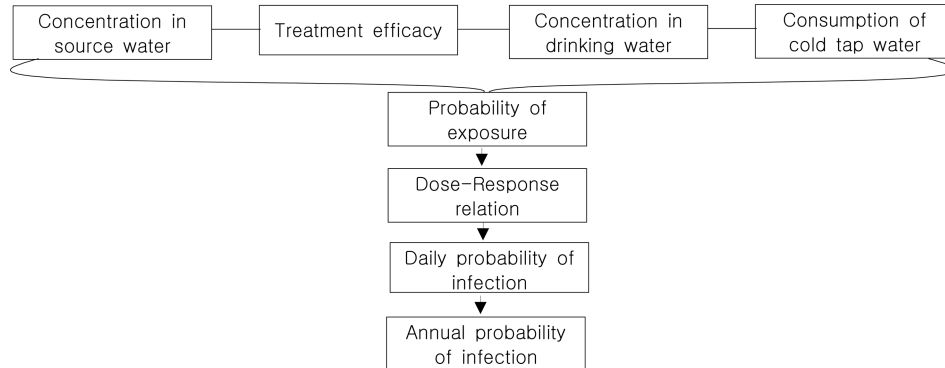


Fig. 1. Scheme on risk assessment of *Cryptosporidium* in tap water.

$$AR = 1 - [1 - C \times I \times P]^n \quad (1)$$

AR : individual annual risk of infection

C : *Cryptosporidium* concentration in tap water (oocysts/Liter)

I : individual daily tap water consumption (Liters)

P : likelihood of infection per oocyst dose

n : annual days per year of exposure

우리나라 먹는물에 의한 크립토스포리디움 노출 정도는 수도물의 크립토스포리디움 농도(C)와 수도물 음용량(I)으로 결정된다. 수도물의 크립토스포리디움 농도(C)는 상수원수의 난포낭 농도(S)와 정수처리에 의한 제거정도(T)로부터 산출하였으며, 식(2)와 같다.

$$C = S \times 10^{-T} \quad (2)$$

S : *Cryptosporidium* concentration in source water (oocysts/Liter)

T : Water treatment efficacy (log-removal)

이때 상수원수 농도는 시설용량 5만 m³/일 이상의 중대규모 정수장 97개소를 대상으로 2년간 각 8점씩의 원수시료를 채취하여 크립토스포리디움 농도 등을 분석한 원생동물 전국분포실태조사 데이터를 사용하였다. 매회 채취, 분석된 시료는 각 10L이었으며 검출 및 계수에 적용된 방법은 면역형광항체염색법(Immunofluorescence Assay)이었다. 면역형광항체염색법에 의한 크립토스포리디움 검출 회수율은 통상 50%에 못미치며 활성이나 감염성여부를 정확

히 파악할 수 없지만, 본 연구에서는 원 데이터를 그대로 적용하였다. 정수장별 8회 조사에서 얻어진 원수 데이터가 가질 수밖에 없는 불확실성과 실제 분포 자체의 변이성, 그리고 검출방법이 갖는 변이성을 고려하여 Distribution Fitting을 통해 확률분포를 결정하였다. 정수처리에 의한 크립토스포리디움 난포낭 제거율은 삼각형 분포를 적용하고, 이때 삼각형을 이루는 세 개의 점은 최소값 2.0log, 최대값 4.5log, 최빈수(mode) 2.5log로 하였다.

한편 수도물 음용량은 크립토스포리디움 난포낭이 60°C 이상으로 물을 끓이면 쉽게 불활성화되므로, “끓이지 않은 수도물”만을 고려하였다. 그러나 현재 우리나라에서 수도물 음용량만을 별도로 조사한 보고가 전무하므로, 본 연구에서는 냉수음용량을 조사한 Robertson et al.의 호주 멜버른연구 데이터를 활용하였다.⁹⁾ 멜버른과일연구에서는 1인당 하루 평균 3.49잔 (0.25 L/잔)의 냉수를 마시는 것으로 보고 1인 1일 냉수 음용량을 평균 0.8725 L/day로 제안하였으며, 포아송분포를 적용하였다.

용량반응평가(Dose-Response Assessment)는 우리나라 사람에 특이적인 감염성연구모델이 없기 때문에, 본 연구에서는 US Environmental Protection Agency(USEPA)의 감염력 데이터를 적용하였는데,⁶⁾ USEPA는 6회의 사람감염연구 결과를 종합적으로 모델화하여 난포낭 1개 섭취시 감염확률 평균을 4~16%의 범위(중위수 9%)로 예측하였다.

이러한 자료들을 종합하여 1일 감염위해도(Daily Risk, DR)를 추정하고, 연간노출기간 즉 수도물 음용기간을 365일로 가정하여 최종적으로 연간감염위해도(Annual Risk, AR)를 산출하였다. 이 때 @RISK

Table 1. Summary of epidemiological studies on cryptosporidiosis in Korea

Surveyed period	Surveyed area	No. positive /No. total	Positive rate(%)	Genotype	Reference
1992	Seoul (Immunocompetent)	4/853	0.5%	C. parvum	Chai et al., 1996 ¹³⁾
1992-1995	Jeollanam-do (Immunocompetent)	244/2,293	10.5%	C. parvum	Chai et al., 1996
1996.11-1997.2	Puan-gun, Jeollabok-do (Immunocompetent)	1/153	0.7%	C. parvum	Chai et al., 1998 ¹⁴⁾
1996.11-1997.2	Sachon-gun, Kyongsangnam-do (Immunocompetent)	6/138	4.3%	C. parvum	Chai et al., 1998
1993.8	Chorwon-gun, Kangwan-do (Immunocompetent)	9/461	1.9%	C. parvum	Seo et al., 2001 ¹⁵⁾
2001.9-2002.6	Chuncheon-si, Kangwan-do	15/691	2.2%	C. parvum	Yu et al., 2004 ¹⁶⁾
2002.6	Gokseong-gun, Jeollanam-do (Immunocompetent)	119/1,458	8.2%	C. parvum	Yu et al., 2004
2001.9-2002.6	Chungju-si, Chungcheongbuk-do (Immunocompetent)	21/1,945	1.1%	C. parvum	Yu et al., 2004
2001.9-2002.6	Haman-gun, Kyongsangnam-do (Immunocompetent)	2/485	0.4%	C. parvum	Yu et al., 2004
2001.9-2002.6	Uiryong-gun, Kyongsangnam-do (Immunocompetent)	2/179	1.1%	C. parvum	Yu et al., 2004
1995-2003	Seoul (HIV-diarrhea)	7/67	10.5%	C. parvum	Guk et al., 2005 ¹⁷⁾
2003.8-2004.7	Jeollanam-do (non-HIV diarrhea)	9/942	1%	C. parvum	Lee et al., 2005 ¹⁸⁾
2000.12	Hwasun-gun, Jeollanam-do	7/27	25.9%	C. parvum, C. hominis	Park et al., 2006 ¹⁹⁾
2000.7	25 coastal islands, Jeollanam-do (Immunocompetent)	38/2,541	1.5%	C. parvum, C. hominis	Park et al., 2006 ²⁰⁾
2004-2006	Gyeonggi-do (Gastroenteritis)	23/6,071	0.4%	C. parvum	Huh et al., 2009 ²¹⁾
2004-2006	Korea (Hospitalized - diarrheal Patients)	215/76,652	0.28%	C. parvum	Cheun et al., 2010 ²²⁾

(Version 5.5, Palisade)을 활용하여 Monte Carlo Simulation을 구동하였으며, 반복시행횟수는 10,000 이상으로 하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 유해 확인

크립토스포리디움증(Cryptosporidiosis)의 주된 증상은 설사, 메스꺼움, 구토, 발열, 두통, 식욕 상실 등이다. 증상은 보통 2일에서 10일까지 지속되는데, 정상적인 면역체계를 가진 정상인의 경우, 면역력에 의해 자연치유된다. 그러나 효과적인 치료제가 개발되어 있지 않아, AIDS환자와 같은 심각한 면역결핍 환자나 면역억제치료를 받고 있는 환자는 지속적인 설사로 체중감소, 심한 탈수에 이르러 치명적일 수 있다.

수인성 경로를 통한 크립토스포리디움 집단발병사례들은 미국, 일본, 영국 등 외국에서 빈번하게 보고되어 왔다. 1971년부터 2006년 사이 미국에서 발생한 수인성 집단발병사례의 18.4%에서 크립토스포리디움 등 기생성 원충이 원인이었다.¹⁰⁾ 특히 1993년 4월 미국 밀워키에서 수도물의 크립토스포리디움으로 약 40여만명이 감염된 사례에서는 난포낭의 감염력이 평균 18.75%로 매우 높게 나타났다.⁶⁾ 영국에서도 1983년부터 2005년까지 공공상수도와 관련된 크립토스포리디움증 집단발병이 55건이 보고될 만큼 빈번하였고,¹¹⁾ 일본에서도 1990년대 오코세마치 집단감염사례 등 2건의 집단발병사례 보고가 있었다.¹²⁾

우리나라에서는 아직까지 먹는물에 의한 크립토스포리디움 집단감염사례가 보고된 바 없지만, 사람이나 가축의 감염사례에 대한 보고는 많이 있다. 우리

Table 2. Summary of *Cryptosporidium* infection cases in domestic animals of Korea

Animal host	No. positive/ No. total	Positive rate (%)	Genotype	surveyed area	Reference
Cattle	67/754	8.9%	<i>C. parvum</i>	Chungju-si, Chungcheongbuk-do	Yu et al., 2004 ¹⁶⁾
	107/109	98.2%	<i>C. parvum</i>	Gokseong-gun, Jeollanam-do	Yu et al., 2004
	7/17	41.2%	<i>C. parvum</i> , <i>C. hominis</i>	Hwasun-gun, Jeollanam-do	Park et al., 2006 ¹⁹⁾
Dairy cattle	84/84	100%	<i>C. parvum</i>	Gokseong-gun, Jeollanam-do	Yu et al., 2004 ¹⁶⁾
Pig	62/589	10.5%	<i>C. parvum</i>	Chungcheong-do	Yu et al., 2004 ²³⁾
	48/482	9.9%	<i>C. parvum</i>	Chungju-si, Chungcheongbuk-do	Yu et al., 2004
	4/11	47.7%	<i>C. parvum</i>	Gokseong-gun, Jeollanam-do	Yu et al., 2004
Deer	9/13	69.2%	<i>C. parvum</i>	Gokseong-gun, Jeollanam-do	Yu et al., 2004 ¹⁶⁾
Goat	3/7	42.9%	<i>C. parvum</i> , <i>C. hominis</i>	Hwasun-gun, Jeollanam-do	Park et al., 2006 ¹⁹⁾
Cat	6/56	10.72%	<i>C. parvum</i> , <i>C. muris</i>	Deajeon-si	Park et al., 1996 ²⁴⁾
Dog	19/144	13.2%	<i>C. parvum</i>	ChunChon-si, Kangwan-do	Kim et al., 1998 ²⁵⁾
	5/29	17.2%	<i>C. parvum</i>	Kwachon-si, Kyoungki-do	Kim et al., 1998
	0/11	0.0%	<i>C. parvum</i>	Sangju-si, Kyoungsangnam-do	Kim et al., 1998
	1/73	1.4%	<i>C. parvum</i>	Songnam, Kyoungki-do	Kim et al., 1998

나라 사람의 감염률은 대체로 도시지역보다는 농촌 지역에서 더 높았고, 설사증을 앓고 있는 사람뿐만 아니라 증세를 보이지 않는 사람에서도 크립토스포리디움 감염이 다수 발견되었으며, 대부분 *C. parvum* 이었다(Table 1).¹³⁻²²⁾ 또한 소, 개, 닭, 고양이 등 다양한 가축에서도 감염이 확인되었으며(Table 2), *C. muris*, *C. baileyi* 외에 사람감염성이 있는 *C. parvum* 도 다수 보고되었다.^{16,19,23-25)}

감염된 사람 및 가축이 배출하는 과량의 난포낭에 의해 하수처리장, 축산폐수처리장, 하천, 호소 등의 오염사례 보고도 있었다. 우리나라 하수처리장 방류수에서 1~3 oocysts/L (평균 0.5 oocysts/L)의 난포낭을 발견하였으며, 축산폐수처리장 방류수에서 280~2100 oocysts/100L의 난포낭을 검출한 보고도 있었다. 또한 Jung et al.의 조사에서는 양성검출율이 한강 20%, 금강 20%, 낙동강 10%로 보고된 바 있고,²⁶⁾ 10년간 팔당댐 하류 한강을 조사한 결과 양성검출률 22.5%, 산술평균 0.65 oocysts/10L 및 지점별 최대검출농도 3~22 oocysts/10L을 보고하기도 하였다.²⁷⁾ 이러한 수계에서의 크립토스포리디움 발견은 상수원 오염으로 이어져 수인성 경로에 의한 감염 가능성을 강하게 시사하고 있다.

2. 노출평가

시설용량 5만m³/일 이상의 대규모 정수장 97개소 상수원수에 대한 크립토스포리디움 전국분포조사는 2004년 4/4분기부터 2007년 4/4분기까지 실시한 것으로, 정수장당 8건씩, 총 776건의 시료가 채취되었다. 각 10 L씩 시험된 전체 시료 중 54개 시료에서만 난포낭이 검출되었으며(양성검출률 7.0%), 최대 농도는 7 oocysts/10 L이었다. 정수장별로 보면 34개 정수장에서만 1개 이상의 난포낭이 발견되었고, 정수장별 산술평균의 최대값은 0.1875 oocysts/L이었다.²⁸⁾ 따라서 정수장별 산술평균의 분포는 [Fig. 2]와 같이 왼쪽으로 치우친 모양이었으며 Distribution fitting 결과 지수분포(Exponential distribution)가 적합한 것으로 나타났다. 한편 개별 정수장에 의한 크립토스포리디움 건강위해도를 추정하기 위한 각 정수장별 난포낭 분포는 기하분포(Geometric distribution)가 적합하였다.

조사대상 전체 정수장의 상수원수 난포낭 분포에 지수분포(Exponential distribution)를 적용하고, 정수처리 제거율에는 최빈수 2.5log, 평균 3.0log의 삼각형분포를 적용하여 반복시행횟수 10,000회의 Monte Carlo Simulation을 구동한 결과, 우리나라 대규모

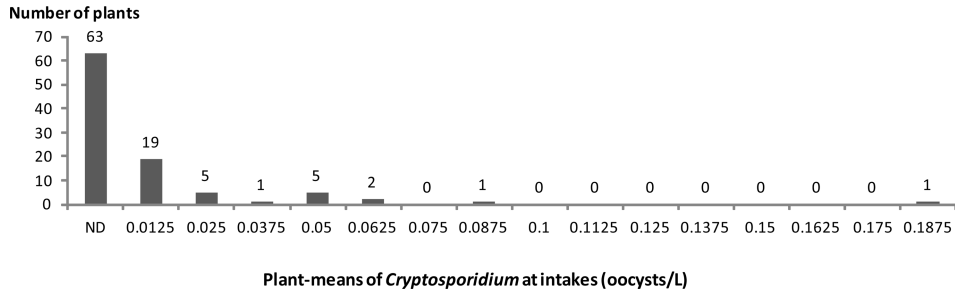


Fig. 2. Distribution of plant-means of *Cryptosporidium* oocysts at intakes of 97 large-scale water purification plants in Korea.

정수장 최종처리수의 크립토스포리디움 농도는 평균 2.0×10^5 oocysts/L (90퍼센타일 5.3×10^5 oocysts/L)로 추정되었다. 일일 냉수 음용량을 고려하면, 우리나라 대규모 정수장 수돗물 급수지역의 1인 1일 크립토스포리디움 노출량은 평균 1.7×10^5 oocysts (90퍼센타일 4.4×10^5 oocysts)으로 추정되었다.

조사대상 중 하천수를 상수원으로 이용하는 정수장 39개소와 호소수를 이용하는 58개소의 원수 평균농도는 각각 1.9×10^2 oocysts/L와 5.1×10^3 oocysts/L이었다. 일일음용량을 고려한 1인 1일 노출량은 각각 3.0×10^5 (90퍼센타일 7.9×10^5 oocysts/L)과 8.0×10^6 (90퍼센타일 2.5×10^5 oocysts/L)으로 하천수 이용시 크립토스포리디움에 대한 노출정도가 약 4배 정도 높은 것으로 예측되었다.

3. 용량반응평가

용량반응관계는 두가지 요인 즉 사람이 섭취한 크립토스포리디움 난포낭의 수(dose)와 이에 의한 감염확률(*r*)의 함수이다. 이 중 두 번째 요인인 감염확률(*r*)은 크립토스포리디움 species 및 strains에 따라 다르며 숙주의 감수성에 따른 변이도 매우 크기 때문에 한 개의 분리주를 사용하는 1회의 human volunteer study 결과만을 사용하여 건강위해도를 추정할 경우 실제 건강영향보다 과대 평가하거나 과소 평가할 가능성이 매우 높다. USEPA는 여러번의 human volunteer studies로부터 얻어진 다양한 용량 반응데이터를 적용하여 감염확률(*r*)의 분포를 추정하였다. 초기 크립토스포리디움 사람감염실험에서 사용된 *C. parvum* 난포낭의 ID₅₀은 132개와 12.1개, 2,066개이었지만, 미국의 크립토스포리디움증 환례 및 집단감염사례 92건에 대한 조사에서 주요한 원

인으로 확인된 *C. hominis* 분리주를 사용해 사람감염실험을 수행한 결과에서는 난포낭 10개만으로도 100%가 감염되었다. 이처럼 크립토스포리디움의 감염력의 범위가 매우 넓고 다양한 것으로 확인됨에 따라, USEPA는 이후 사람감염실험을 몇차례 추가해 총 6회의 사람감염연구 결과를 종합하였고, 감염확률 분포모델 분석을 통해 1개의 감염성 난포낭에 의한 평균 감염확률을 4~16% 범위(중위수 9%)로 평가하였다. 본 연구에서는 USEPA의 연구결과를 그대로 적용해 중간정도의 난포낭 감염력을 9%로 보고, 감염력이 낮을 때와 높을 때를 각각 4%와 16%로 하여 건강위해도의 범위를 산출하였다.

4. 위해도 추정 결과

1개의 난포낭 섭취시 감염확률을 4~16%로 보고, 식(1)의 모델에 따라 Monte Carlo Simulation을 구동한 결과, 우리나라 대형 정수장 최종처리수의 크립토스포리디움에 의한 연간감염확률 평균은 $2.3 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-3}$ 의 범위로 추정되었다. 중간 정도의 난포낭 감염력을 가정할 때의 평균 연간감염확률은 5.7×10^{-4} 이었으며, 90퍼센타일은 1.5×10^{-3} 이었다(Fig. 3).

하천수를 상수원으로 이용하는 경우와 호소수를 이용하는 경우의 평균위해도는 중간 정도의 난포낭 감염력을 가정할 때 각각 9.9×10^{-4} (범위 $4.4 \times 10^{-4} \sim 1.8 \times 10^{-3}$)과 2.6×10^{-4} (범위 $1.1 \times 10^{-4} \sim 4.8 \times 10^{-4}$)로, 하천수 이용시 약 4배 정도 높은 건강위해도를 갖는 것으로 추정되었다(Fig. 4).

한편 민감도분석(Sensitivity Analysis) 결과, 상수원수 수질과 정수처리효율이 거의 비슷하게 연간감염확률에 영향을 주는 것으로 나타났다(Fig. 5). 이에 따라 정수공정에 의한 난포낭 제거율을 평균

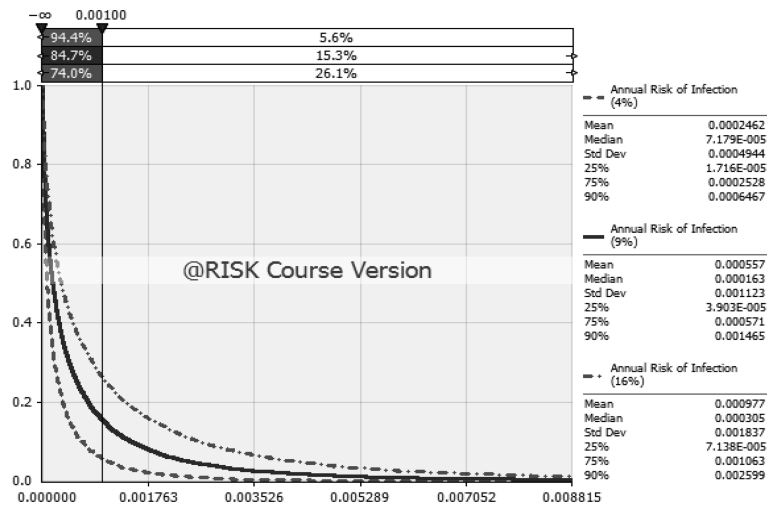


Fig. 3. Individual annual risk of infection by *Cryptosporidium* in tap water of Korea with high, medium and low likelihood of infection per oocyst dose.

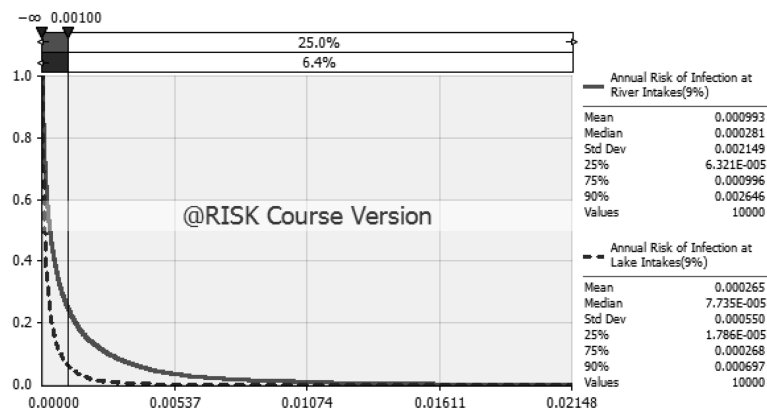


Fig. 4. Comparison on annual risk of infection by *Cryptosporidium* in tap water from large-scale water purification plants using river and lake as water source.

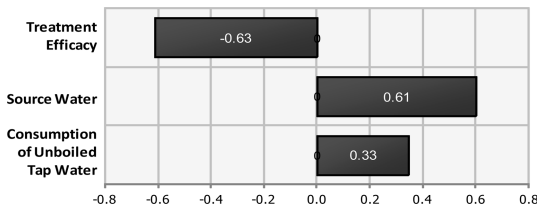


Fig. 5. Results of sensitive analysis by Spearman rank correlation calculation technique.

0.5log 향상시키는 경우, 연간감염확률 평균은 $3.2 \times 10^{-4} \sim 7.9 \times 10^{-5}$ 의 범위(중위수 1.8×10^{-4})로 개선되어, 10,000명당 5.7명의 감염확률을 1.8명의 감염확률로

대략 1/3 정도 낮출 수 있을 것으로 예측되었다.

한편 각 정수장별로 원수의 크립토스포리디움 오염수준이 다르기 때문에 2년간의 원수 데이터에 기초하여 정수장별 건강위해도도 추정된 결과, 상대적으로 오염도가 높은 15개 정수장의 평균연간감염확률은 중간정도의 감염력을 가정할 때 $1.3 \times 10^{-3} \sim 9.7 \times 10^{-3}$ 의 범위로 모두 연간 만명당 10명을 초과하는 감염확률을 갖는 것으로 예측되었다(Table 3). 특히 가장 높은 원수 오염도를 보인 정수장의 경우, 낮은 감염력에서도 평균 4.4×10^{-3} 의 다소 높은 위해도를 보였다.

Table 3. Estimates on individual annual risk of infection by *Cryptosporidium* in finished water of each large-scale water purification plant in Korea

No.	Plant-mean of oocysts (/L)	Number of plants	Mean of individual annual infection risk	
			Medium	Range
1	0.1875	1	9.7×10^{-3}	$4.4 \times 10^{-3} \sim 1.7 \times 10^{-2}$
2	0.0875	1	4.4×10^{-3}	$2.1 \times 10^{-3} \sim 7.6 \times 10^{-3}$
3	0.0625	2	4.5×10^{-3}	$2.0 \times 10^{-3} \sim 7.9 \times 10^{-3}$
4	0.0500	5	2.4×10^{-3}	$1.2 \times 10^{-3} \sim 4.5 \times 10^{-3}$
5	0.0375	1	1.9×10^{-3}	$9.0 \times 10^{-4} \sim 3.4 \times 10^{-3}$
6	0.0250	5	1.3×10^{-3}	$5.9 \times 10^{-4} \sim 2.3 \times 10^{-3}$

5. 건강위해도 추정치의 향후 과제

수돗물 중의 병원성 미생물에 대한 노출평가는 일반적으로 최종 처리수 즉 수돗물의 크립토스포리디움 함유량과 수돗물 음용량에 의해 이루어진다. 그러나 최종처리수의 크립토스포리디움 농도가 매우 낮기 때문에 실제 위해도평가에 활용할 만한 정량적 데이터를 얻는 것은 현실적으로 매우 어렵다. 2000년부터 10년간 수돗물 100 L씩을 총 240점 채취하여 분석한 결과 한번도 난포낭이 검출된 적이 없었으며,²⁷⁾ 시료량을 1000 L 이상으로 늘렸을 때에 크립토스포리디움 난포낭이 미량 발견되었다는 보고가 있었다.²⁹⁾ 따라서 본 연구에서는 처리수 대신 원수의 농도와 정수공정에 의한 제거정도로부터 처리수의 함유량을 추정하는 간접적인 방법을 사용하였다. 이러한 간접적인 방법은 위해도평가에 이은 위해도 관리단계에서 현실적으로 관리될 수 있는 부분이 원수 변경이나 처리공정 개선 등이라는 점에서도 더욱 유효하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 우리나라 상수원수의 크립토스포리디움 농도로써, 총 97개소의 대규모정수장을 대상으로 실시한 원생동물 전국분포실태조사 데이터를 적용하였다. 이 조사는 우리나라에서 처음으로 전국단위의 크립토스포리디움 분포를 파악한 것이지만, 수집된 데이터가 정수장별로 8개에 불과하고 난포낭이 검출된 시료도 7%에 불과해 보다 신뢰도 높은 위해도평가를 위해서는 분석시료수와 1회 분석시료량을 늘려야 할 것으로 생각된다. 한편, 이들 실태조사에 사용된 분석방법의 한계도 검토되어야 한다. 본 연구에서 활용된 상수원수 크립토스포리디움 데이터에서는 회수율에 관한 정보가 언급되지 않아 정확한 수치를 알 수 없지만, 조사에 참여한 한 실험실에서

3년간 Matrix spike test를 병행하여 평균 46%의 회수율(범위 13~73%)을 보고한 사례가 있으며,³⁰⁾ 10년간의 평균회수율이 42%라는 보고도 있었다.²⁷⁾ 반면, 활성 및 감염성을 잃은 난포낭까지 검출되는 한계점으로 인해, 크립토스포리디움 데이터는 음의 보정 즉 하향 조정될 필요가 있다. CC-PCR (Cell Culture - Polymerase Chain Reaction)을 병행 적용한 한 연구는 면역형광항체법으로 난포낭이 검출된 시료 60개 중 22개(37%)가 CC-PCR 양성 즉 활성을 가진 난포낭을 함유하였다고 보고하였다.³¹⁾ 본 연구에서는 낮은 회수율로 인한 상향조정의 필요성과 활성 및 감염성을 고려한 하향조정의 필요성을 동시에 감안하여 원데이터를 그대로 적용하였으나, 향후 보다 정확한 위해도평가를 위해서는 분석방법의 두가지 한계점이 해결되어야 할 것이다.

본 연구에서 정수처리에서의 난포낭 제거율에 최빈수 2.5log, 평균 3.0log를 적용한 것은 조사대상이 모두 시설용량 5만 m³/일 이상의 대규모 정수장으로, 2002년부터 시행되고 있는 우리나라 정수처리기준에 따라 대체로 최적 운영되고 있다고 간주되기 때문이다. WHO(2009)는 최적운영 되는 급속여과시스템에서의 제거율을 2.5log 내외로 보았으며,³²⁾ USEPA 또한 표준정수처리를 거치면서 통합여과수탁도 월 측정치의 95% 이상이 0.3 NTU 이하가 되도록 유지관리되고 있는 미국내 중대형정수장의 제거율을 평균 3.0log로 평가하였다.⁶⁾ 이는 14회의 소규모 파일럿연구와 대형 플랜트에 대한 적용시험 결과, 최적응집조건일 때 표준정수처리시스템에서의 제거율이 2.9~4.4log (평균 3.7log 이상)이었으며,³³⁾ 미국의 24개 정수장 조사에서 호기성아포균의 제거율이 2.84log이었다는 보고와도 관련된다.³⁴⁾ 우리나라

에서도 박 등이 크립토스포리디움 유사체를 이용한 표준정수처리 파일럿 플랜트 실험을 통해 3.3~4.8log의 제거효율을 보고한 사례가 있었으며,³⁵⁾ 한강 상수원을 이용하는 실제 정수장에서 크립토스포리디움 제거율이 겨울철 응집침전공정에서는 1.2~1.7log를 초과하고,³⁶⁾ 여과공정까지 최소 2.0~2.3log를 초과하며 이때 호기성 포자균 제거율이 평균 2.9log(1.9~3.9log)임을 확인한 보고가 있었다.²⁷⁾

노출평가에 있어 또다른 중요한 인자는 수돗물 음용량이다. 전통적으로 먹는물에 의한 위해도평가에서는 평균 2L의 음용량을 적용해왔다.³⁷⁾ 그러나 60°C 이상으로 물을 끓이면 난포낭이 쉽게 불활성화되므로, 끓인 물까지 음용량에 포함할 경우 위해도가 과대 평가될 수 있다. 또한 음용량은 연령대나 성별, 신체상태에 따라 달라질 수 있는데, 미국의 음용량 조사에서는 나이트 사람일수록 수돗물을 더 많이 소비하는 경향을 밝혔다.³⁸⁾ 우리나라에서는 커피, 차 등의 형태로 먹는물을 음용하는 경우가 많고 그 외에 수돗물 불신 때문에 끓인 물을 음용하는 경우도 있는 것이 사실이지만, 본 연구에서는 끓이지 않고도 미생물학적 안전성이 충분히 확보되는 수질을 목표로 하였으므로, 냉수의 음용량을 위해도평가에 적용하고자 하였다. 그러나 현재 우리나라에서 수돗물 음용량만을 별도로 조사한 보고가 전무하므로 냉수 음용량을 조사한 Robertson et al.(2002)의 호주 멜버른연구 데이터를 적용하였다. 네델란드의 한 수도회사는 네델란드 음용수지침의 10⁻⁴ 위해도 기준의 만족여부를 평가하기 위한 QMRA에서 이러한 멜버른연구 결과를 활용한 바 있다.³⁹⁾

용량반응관계는 사람이 섭취한 크립토스포리디움 난포낭의 수와 이에 의한 감염확률의 관계를 나타낸 것으로, 보통 Volunteer studies에 의해 얻어질 수 있다. 최초의 크립토스포리디움 사람감염실험에서 사용된 난포낭에서의 ID₅₀은 132개이었고 지수모델식이 적용되었다. 그러나 이후 추가된 사람감염연구를 통해 크립토스포리디움의 감염력의 범위가 매우 넓고 다양한 것으로 확인되었고, USEPA는 이러한 총 6회의 사람감염연구 결과를 종합하여 1개의 감염성 난포낭에 의한 평균감염확률을 4~16% 범위(중위수 9%)로 평가하였다. 본 연구에서는 우리나라 사람에 대한 용량반응모델이 마련되어 있지 않아 이러한 USEPA의 용량반응모델의 점추정치를 그대로 적용

하였으나, 병원성 미생물에 노출되더라도 사람의 특성 즉 유전적 특징, 면역내성, 특정 환경에의 노출 경험 등에 따라 감염여부나 발병여부가 달라질 수 있기 때문에 본 연구결과는 분명한 한계를 가진다. 특히 면역력이 약화된 환자나 면역결핍환자는 크립토스포리디움 감염에 매우 취약하므로 별도의 용량 반응모델이 적용되어야 할 것이다.

이러한 많은 한계점에도 불구하고, 본 연구는 우리나라 상수원수의 크립토스포리디움 분포데이터에 기초해 수돗물에 의한 건강위해도를 추정하였으며, 특히 불확실성과 변이성을 고려해 확률론적인 방법으로 위해도 범위를 도출하였다는데 의의가 있다고 판단된다. 이러한 방법론은 향후 중소규모 정수장이나 마을상수도에서의 건강위해도를 추정하는데도 적용될 수 있으며, 이를 통해 우리나라 전체 먹는물의 건강위해도에 대한 보다 종합적인 이해에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 우리나라 대규모 정수장 97개소의 상수원수 중 크립토스포리디움 분포실태자료에 기초하여 수돗물의 크립토스포리디움에 의한 건강위해도를 확률론적 방법으로 추정하였다. 상수원수의 난포낭 농도 및 정수처리효율로부터 최종처리수 난포낭 농도를 도출하고 외국의 냉수 음용량 및 난포낭 1개 섭취시 감염확률 데이터를 적용하여 Monte Carlo Simulation을 구동한 결과는 다음과 같다.

1. 우리나라 수돗물의 크립토스포리디움에 의한 연간감염확률 평균은 $2.3 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-3}$ 의 범위로 추정되었으며, 중간 정도의 난포낭 감염력을 가정할 때의 평균 연간감염확률은 5.7×10^{-4} 이었다.
2. 특히 원수오염도 상위 15개 정수장의 경우에는 중간정도의 감염력에서 $1.3 \times 10^{-3} \sim 9.7 \times 10^{-3}$ 의 범위로 모두 연간 만명당 10명을 초과하는 감염확률을 보여, 이들 정수장에 대해 정수처리공정 개선이나 상수원 변경 등을 통한 위해도관리가 보다 필요한 것으로 판단되었다.
3. 하천수를 상수원으로 이용하는 경우와 호소수를 이용하는 경우의 평균위해도는 중간 정도의 난포낭 감염력에서 9.9×10^{-4} (범위 $4.4 \times 10^{-4} \sim 1.8 \times 10^{-3}$)

과 2.6×10^{-4} (범위 $1.1 \times 10^{-4} \sim 4.8 \times 10^{-4}$)로, 하천수 이용시 약 4배 정도 높은 건강위해도를 갖는 것으로 추정되었다.

4. 민감도분석 결과, 상수원수 수질과 정수처리효율이 거의 비슷하게 연간감염확률에 영향을 주는 것으로 나타났으며, 정수공정에서의 난포낭 제거율을 평균 0.5log 향상시키는 경우, 연간 건강위해도를 1/3 수준으로 낮출 수 있을 것으로 예측되었다.

허용가능한 건강위해도를 얼마로 할 것인지에 대해서는 기술적인 고려 이외에 경제·정책적인 고려와 사회적인 합의가 필요하다. 그러나 현재 수준에서의 크립토스포리디움에 의한 건강위해도를 과학적으로 추정하는 일은 정수처리공정 개선이나 새로운 정수기술 도입, 취수원수 변경 등 최적의 위해도관리 전략 수립 및 투자 규모 결정시 중요한 판단기준자료가 될 수 있을 것이다. 또한 이러한 방법론은 향후 중소규모 정수장이나 마을상수도에서의 건강위해도를 추정하는데도 적용될 수 있으며, 이를 통해 우리나라 전체 먹는물의 건강위해도에 대한 보다 종합적인 이해에 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 아울러 향후 보다 정확한 위해도평가가 이루어지기 위해서는 크립토스포리디움 검출방법 및 조사방법의 개선과 우리나라 자체의 음용량 정보 및 우리나라 사람에 적합한 용량반응관계 데이터 확보를 위한 연구가 추진되어야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. World Health Organization. Guidelines for Drinking Water Quality Vol. 2. Health Criteria and Other Supporting Information. 2nd Edition; 1996. p.56- 58.
2. Korich DG, Mead JR, Madore MS, Sinclair NA, Sterling CR. Effects of ozone, chlorine dioxide, chlorine, and monochloramine on *Cryptosporidium parvum* oocysts viability. *Appl Environ Microbiol.* 1990; 56(5): 1423-8.
3. Byun SH, Lee MY, Cho EJ, Yoon TH, Kim TH, Han SH. Inactivation of infectious *Cryptosporidium parvum* by various disinfectants. *Korean J KSEE.* 2007; 29(5): 533-539.
4. Bahk GJ, Oh DH, Ha SD, Park KH, Joung MS, Chun SJ, et al. Quantitative microbial risk assessment model for *Staphylococcus aureus* in Kimbab. *Korean J Food Sci Tech.* 2005; 37(3): 484-491.
5. United State Environmental Protection Agency. National Primary Drinking Water Regulations; Surface Water Treatment Rule; 1989.
6. United State Environmental Protection Agency. Occurrence and Exposure Assessment for the Final Long Term 2 Enhanced Surface Water Treatment Rule. Office of Water (4606-M) EPA 815-R-06-00; 2005.
7. VROM - Inspectorate. Inspectorate Guideline-Assessment of the microbial Safety of drinking Water; 2005.
8. Joint FAO/WHO Codex Alimentarius Commission. Principles and Guidelines for the Conduct of Microbiological Risk Assessment : CAC/GL-30 (1999) ; 1999.
9. Robertson B, Sinclair MI, Forbes AB. Case-control study of sporadic cryptosporidiosis in Melbourne and Adelaide, Australia. *Epidemiol Infect.* 2002; 128: 419-431.
10. Craun GF, Brunkard JM, Yoder JS, Roberts VA, Carpenter J, Wade T, et al. Causes of outbreaks associated with drinking water in the United States from 1971 to 2006. *Clin Microbiol Rev.* 2010; 23(3): 507-528.
11. Nichols G, Chalmers R, Lake I, Sopwith W, Regan M, Hunter P, et al. *Cryptosporidiosis* : A report on the surveillance and epidemiology of *Cryptosporidium* infection in England and Wales. Drinking Water Directorate; 2006.
12. Inomata A, Hosaka M, Yaguchi K. Contamination of raw and drinking water by protozoan parasites and an attempt on risk assessment of infection caused by drinking water consumption. *Ann Rep Tokyo Metr Inst PH.* 2006; 57: 313-318.
13. Chai JY, Lee SH, Guk SM, Lee SH. An epidemiological survey of *Cryptosporidium parvum* infection in randomly selected inhabitants of Seoul and Chollanam-do. *Korean J Parasitol.* 1996; 34(2): 113-119.
14. Chai JY, Song TE, Han ET, Guk SM, Park TK, Choi MH, et al. Two endemic foci of heterophyids and other intestinal fluke infection in southern and western coastal areas in Korea. *Korean J Parasitol.* 1998; 36(3): 155-161.
15. Seo M, Huh S, Chai JI, Yu JR. An epidemiological survey on *Cryptosporidium parvum* infection of inhabitants in Chorwon-gun. Kangwon-do, *Korean J Parasitol.* 2001; 39(2): 201-203.
16. Yu JR, Lee JK, Seo M, Kim SI, Sohn WM, Huh S, et al. Prevalence of *Cryptosporidiosis* among the villagers and domestic animals in several rural areas of Korea. *Korean J Parasitol.* 2004; 42(1): 1-6.

17. Guk SM, Seo M, Park YK, Oh MD, Choi KW, Kim JL, et al. Parasitic infections in HIV-infected patients who visited Seoul National University Hospital during the period 1995-2003. *Korean J Parasitol.* 2005; 43(1): 1-5.
18. Lee JK, Song HJ, Yu JR. Prevalence of diarrhea caused by *Cryptosporidium parvum* in non-HIV patients in Jeollanam-do, Korea. *Korean J Parasitol.* 2005; 43(3): 113-4.
19. Park JH, Guk SM, Han ET, Shin EH, Kim JL, Chai JY. Genotype analysis of *Cryptosporidium* spp. prevalent in a rural village in Hwasun-gun, Republic of Korea. *Korean J Parasitol.* 2006; 44(1): 27-33.
20. Park JH, Kim HJ, Guk SM, Shin EH, Kim JL, Rim HJ, et al. A survey of *Cryptosporidiosis* among 2,541 residents of 25 coastal islands in Jeollanam-do (Province), Republic of Korea. *Korean J Parasitol.* 2006; 44(4): 367-372.
21. Huh JW, Moon SG, Lim YH. A Survey of Intestinal Protozoan Infections among Gastroenteritis Patients during a 3-Year Period (2004-2006) in Gyeonggi-do (Province). South Korea, *Korean J Parasitol.* 2009; 47(3): 303-5.
22. Cheun HI, Cho SH, Lee JH, Lim YY, Jeon JH, Yu JR, et al. Infection Status of Hospitalized Diarrheal Patients with Gastrointestinal Protozoa, Bacteria, and Viruses in the Republic of Korea. *Korean J Parasitol.* 2010;48(2):113-120.
23. Yu JR, Seo M. Infection status of pigs with *Cryptosporidium parvum*. *Korean J Parasitol.* 2004; 42(1): 45-7.
24. Park BK, Cho SW, Kim HS, Satoshi K. Prevalence of cat *Cryptosporidiosis* in Taejon area. *J Vet Sci.* 1996; 4(1): 39-45.
25. Kim JT, Wee SH, Lee CG. Detection of *Cryptosporidium* oocysts in canine fecal samples by immunofluorescence assay. *Korean J Parasitol.* 1998; 36(2): 147-9.
26. Chung HM, Oh DH. *Cryptosporidium* and *Giardia* (oo)cysts in Korean rivers and the effect of sample matrix. *J Korean Soc Water Quality.* 2006; 22(2): 271-6.
27. Lee MY, Cho EJ, Lee JH, Han SH, Park YS. A survey of *Cryptosporidium* oocysts in water supplies during a 10-year period (2000-2009) in Seoul, South Korea. *Korean J Parasitol.* 2010; 48(3): 219-224.
28. Park SJ, Kim JM, Kim TS, Chung DI, Lee MY, Nam SH, et al. Distributional characteristics of *Cryptosporidium* and *Giardia* in raw water of large water treatment facility in Korea. *J Korean Soc Water Quality.* 2010; 26(2): 261-7.
29. Hashimoto A, Hirata T. *Cryptosporidium* oocysts and *Giardia* cysts in Sagami river and its tributaries. *J Water Environ Tech.* 1998; 21(2): 119-122.
30. Lee MY, Cho EJ, Kim DY, Lee EK, Oh SJ, Ahn SK. Improvement of validity and efficiency for detection of *Cryptosporidium* Oocysts and *Giardia* cysts in environmental water samples. *Korean J Microbiol.* 2003; 39(1): 27-35.
31. LeChevallier MW, Giovanni GD, Clancy JL, Bukhari Z, Bukhari S, Jeffrey S, et al. Comparison of method 1623 and cell culture-PCR for detection of *Cryptosporidium* spp. in source waters. *Appl Environ Microbiol.* 2003; 69(2): 971-9.
32. World Health Organization. Risk Assessment of *Cryptosporidium* in Drinking Water : WHO/HSE/WSH/09.04. 2009. p. 28-66.
33. Dugan NR, Fox KR, Owens JH, Miltner RJ. Controlling *Cryptosporidium* oocysts using conventional treatment. *J Am Water Works Assoc.* 2000; 92(12): 64-76.
34. Niminski EC, Bellamy WD, Moss LR. Using surrogates to improve plant performance. *J Am Water Works Assoc.* 2000; 92(3): 67-78.
35. Park SJ, Chung HM, Choi HJ, Jun YS, Kim TS, Chung DI. Evaluation on removal efficiency of *Cryptosporidium* using surrogate in pilot plant of conventional water treatment process. *J Korean Soc Water Quality.* 2010; 26(3): 399-405.
36. Lee MY, Cho EJ, Byun SH, Kim TH, Oh SJ. Evaluation on removal of *Cryptosporidium* oocysts and *Giardia* cysts by flocculation and sedimentation. *Korean J KSEE.* 2004; 26(4): 397-403.
37. Regli S, Rose JB, Haas CN, Gerba CP. Modeling the risk from *Giardia* and viruses in drinking water. *J Am Water Works Assoc.* 1991; 83: 76-84.
38. Roseberry AM, Burmaster DE. Lognormal distributions for water intake by children and adults. *Risk Anal.* 1992; 12: 99-104.
39. Mons MN, van der Wielen JM, Blokker EJ, Sinclair MI, Hulshof KF, Dangendorf F, et al. Estimation of the consumption of cold tap water for microbiological risk assessment: an overview of studies and statistical analysis of data. *J Water Health.* 2007; 5(Suppl1): 151-170.