

레지오넬라균 출현위해도에 대한 현행 온천수 수질기준의 적합성 분석

김진남¹, 이소영², 조영근^{1*}

¹경성대학교 생물학과 및 Brain Busan 21 사업단

²솔빛랩엔업

Received: August 10, 2015 / Revised: August 31, 2015 / Accepted: August 31, 2015

Validation of Korean Water Quality Standards to Hot Springs for Agreement with *Legionella*-Incidence Risk

Jin-Nam Kim¹, Soyoung Lee², and Young-Gun Zo^{1*}

¹Department of Biology and Brain Busan 21 Program, Kyungsung University, Busan 48434, Republic of Korea

²Solbit Lab & App, Busan 47579, Republic of Korea

Observed trends in climate change, globalization and an aging population have an effect on public health conditions in Korea, prompting a reevaluation of current environmental regulations. In this study, we evaluated the performance of the total coliform (TC) standard, which is the only microbiological standard in the current regulation regime for hot spring water, by estimating correlation with the presence/absence of *Legionella*, a non-fecal opportunistic pathogen with heat-tolerance. Microbiological data in 7 studies that surveyed *Legionella* in hot spring waters were subjected to meta-analyses with the odds ratio (OR) as the effect size. The presence/absence of *Legionella* was significantly correlated to TC levels [OR = 3.1(1.5–6.4, 95% CI), $p = 0.002$]. Due to there being no direct explanation as to the reason for the occurrence of TC, mesophilic fecal bacteria, being coupled with *Legionella* presence, the mechanism of the correlation between the two kinds of bacteria was further investigated. *Legionella* presence was more prevalent with a high heterotrophic plate count [HPC; 4.0(2.2–7.2); $p < 0.001$] and water temperature [4.3(1.4–13.6), $p = 0.011$] when the temperature range was $<40^{\circ}\text{C}$. However, it was reverse-correlated with water temperature when the temperature was $>50^{\circ}\text{C}$ [0.2(0.1–0.4), $p < 0.001$]. Therefore, bacterial standing crops in hot spring waters appear to be determined by water temperature in general, and this forces TC and *Legionella* levels be correlated. In accordance with this relationship, HPC rather than TC reflect the levels of non-fecal contamination better. Therefore, employing HPC as the sole microbiological standard, or adding HPC into the current standard of hot spring water assessment, is suggested as a proactive measure to prevent health issues arising from contamination.

Keywords: Hot spring water, microbiological water quality standard, *Legionella*, total coliform, heterotrophic plate count

서론

한국의 보건환경에 큰 영향을 줄 것으로 전망되는 거시적 자연현상과 사회현상을 들자면, 한반도 기후의 온난화와 인구의 고령화, 그리고 인구 및 물자 이동의 세계화를 고려할 수 있다[10, 12, 17]. 이들 현상은 독립적으로 또는 복합적으로 작용하여, 열대성/아열대성 생물과 병원체를 국내로 유입

시키고, 그 빈도는 점증하는 현상을 일으킬 것이다. 또한, 인구의 고령화 때문에 국민의 평균적 면역력은 점차로 약화되고, 다양한 병원체에 대한 인구의 전반적 감수성이 높아지는 현상이 나타나서, 점증하는 외래 병원체의 유입빈도와 더불어, 생활환경에서 발생하는 공중보건상 위해도가 상당히 높아질 것으로 예상할 수 있다[18]. 외래유입 후 빈발하는 장출혈성 대장균이나 노로바이러스에 의한 식중독[16], 중앙값 50세로 고령의 환자에게 주로 발생한 코로나바이러스에 의한 중동호흡기증후군 감염사태 등이 그 예가 될 것이다[http://mers.go.kr/mers]. 따라서, 가까운 미래에 급증할 환경보건상의 위해도에 대응하기 위하여, 기존의 보건 위해요소 관리

*Corresponding author

Tel: +82-51-663-4643, Fax: +82-51-627-4645

E-mail: zoyful@gmail.com

© 2015, The Korean Society for Microbiology and Biotechnology

기준과 관리방법들이 다가오는 미래환경에서 적용될 수 있을 지 평가하고 순응적으로 개선하는 대응 연구가 필요하다.

유해 물질과 병원체로 오염된 지하수는 국민 보건에 위해성을 매개할 수 있다. 국내의 지하수는 다양한 용도로 사용되고 있는 데, 농업용수, 생활용수, 공업용수 형태로 각각 50%, 45%, 4%의 소모량이 집계되고 있다[http://ngims.gims.go.kr]. 농업용 지하수의 활용도가 높은 것은 물을 필요로 하는 주식작물인 벼를 지표수가 부족한 지역에서도 재배하기 때문인 것으로 생각될 수 있지만, 오히려 근래에 쌀 소비와 벼 경작은 감소 추세이며, 지하수를 사용하는 신규 원예농법들에 의한 지하수의 소모가 증가하고 있다. 일례로, 비닐하우스 수막재배와 같은 전천후 농법들이 지하수를 관개수가 아닌 냉난방 용도로도 사용하는 경우를 들 수 있다[20]. 한편, 세분된 용도별로 가장 많은 양의 지하수가 소모되는 형태는 온천수(23%)와 먹는 샘물(13%)의 순으로, 두 경우가 인체와 직접 접촉하는 목욕수 또는 음용수로 사용되는 지하수이기 때문에 지하수의 공중보건 위해요소 관리에 있어서 일차적 대상으로 삼아야 할 것이다.

국내 지하수의 수질은 지하수법에 의하여 관리되고, 지하수 수질 측정망의 운용에 의하여 국토의 전반적 지하수 수질의 상태가 평가되고 있다. 현재 알려진 전국 지하수의 수질은 수질기준에 대체로 부합하여 적정한 상태이지만, 약 6.5%의 지하수 관정이 수질기준을 초과하는 것으로 파악되고 있다[14]. 주로 총대장균군 수의 초과가 수질기준에 따른 지하수 수질의 부적합 사유였다. 용도별로는 생활용수의 수질기준 초과 빈도(6.8%)가 가장 높는데, 농어업용수(3.0%)와 더불어 사용량의 대부분을 차지한다는 점을 고려하면, 생활용수로 사용되는 지하수의 미생물학적 위해도 관리가 지하수 수질관리의 핵심적인 부분이라 할 수 있다. 따라서, 온난화, 고령화, 세계화 현상이 지하수를 매개로 국민 보건에 점증하는 위해도를 관리하기 위하여서는 생활용수로 사용되는 지하수의 미생물학적 위해도를 관리하는 수질기준을 선제적으로 정비하는 것이 바람직할 것이다.

단일 세부 용도별로 분류하였을 때, 온천수 사용량이 전체 지하수 사용량의 23%로 가장 많다[http://ngims.gims.go.kr]. 온천법 2조에 따르면, 온천수는 섭씨 25도 이상의 온도를 보이면서 인체에 유해한 수준의 위해성분이 없는 지하수를 일컫는다. 온천수의 수질관리는 온천법에 따라 세부적으로 정해진다고 볼 수 있지만, 온천수는 지하수이기 때문에 지하수법의 적용을 또한 받으며, 그 사용용도가 목욕수이면 공중위생관리법의 목욕장 관리조항들, 음용수이면 먹는물관리법의 조항들의 적용될 수 있다. 온천법의 경우, 미생물학적 기준 항목으로 총대장균군의 수만을 단순하게 정하고 있는 데, 원수에서 100 ml당 불검출, 목욕수에서 1 군체 이하 검출을 기준으로 삼고 있다. 그러나 대장균은 분변성 세균의 오염에

대한 지표로, 바이러스, 원생생물, 내열성이 있는 병원성 세균에 대한 지표로 작용하지 못할 수 있다. 또한, 신규 병원체가 종전보다 높은 빈도로 유입되고 인구의 병원체 감수성이 증가하는 변화가 미래기후에서 예상되므로, 이 기준이 분변성 오염 이외의 위해요소로부터 온천수의 미생물학적 위해성을 적합하게 관리할 수 있을 지 검토되어야 할 필요가 있다.

제3군 법정 전염병으로 지정되어 관리되고 있는 레지오넬라증은 내열성이 높고 생물막과 원생동물에 기생하는 능력을 가진 *Legionella pneumophila* 세균이 폐세포에 감염하여 발생하는 호흡기 질환으로, 온도가 높거나 온도변화가 심한 온수에서 에어로졸로 분무되어 주로 실내환경에서 감염을 일으킨다[http://www.cdc.go.kr/CDC/health]. 국내에서 연간 약 30명의 환자를 발생시키는 데, 해외에서는 수영장, 일반적인 목욕장, 그리고 온천 목욕장에서 감염 위험도가 잘 알려져 있다[2]. 최근의 보고들에 따르면, 고령자에 대한 감염률이 증가하는 추세이다[24]. 국내외에서 주로 여름철에 발생하는 경향을 보이므로[2, 24; http://is.cdc.go.kr/dstat], 고령화와 온난화의 영향을 받아 앞으로 더 감염빈도가 증가할 것으로 예상할 수 있다. 원생생물의 서식과 생물막 형성이 용이하고, 수온 변동성이 높은 조건에서 상대적으로 높은 생존력을 보이므로, 총대장균군의 세균들과 같이 분변성 오염과는 다른 경로를 통하여 온천수 수질을 악화시키는 병원체이다[3]. 따라서, 총대장균군의 검출만으로 구성된 현행 온천법의 수질관리 기준이 온천수의 미생물학적 위해성을 적절히 반영하는 지 검정하는 데 사용할 수 있는 적절한 평가항목이 될 수 있다.

본 연구는, 현행 수질기준들이 국내 보건환경의 주요 변화 추세에 적합한지 파악하기 위한 일환으로 지하수 중 사용량이 가장 많은 온천수를 대상으로 삼아, 총대장균군의 수를 측정하는 것으로 구성된 현행 온천법의 온천수 수질기준이 분변성 오염에 기인하지 않는 병원체에 의한 미생물학적 위해도를 적절히 관리할 수 있는 지 검정함을 목표로 하였다. 수질기준의 위해도 관리 적절성을 일례로 평가하는 발상으로, 내열성과 자연환경 유래의 특징을 가진 병원체인 레지오넬라균의 검출이 온천수에서 총대장균군의 검출과 상관성을 가지는 지를 분석하기로 하고, 기존 조사자료에 나타난 정보에 근거하여 두 세균군의 검출률간의 상관성에 대한 메타분석을 실시하였다.

재료 및 방법

자료수집

기존의 레지오넬라균 분포에 대한 환경조사를 국내외 논문과 보고서에서 검색한 결과 약 1997-2015년간 35개의 연

Table 1. List of studies subjected to meta-analysis.

Code ^a	Location	No. of samples	Method for detection ^b			Reference
			<i>Legionella</i>	TC	HPC	
H06	Taiwan	91	PCR/CFU	CFU	CFU	Hsu <i>et al.</i> [6]
H09	Taiwan	34	PCR/CFU	CFU	CFU	Hsu <i>et al.</i> [7]
Hu10	Taiwan	72	PCR/CFU	CFU	CFU	Huang <i>et al.</i> [9]
Hu11	Taiwan	68	PCR/CFU	CFU		Huang <i>et al.</i> [8]
Q13	China	96	CFU	MPN	CFU	Qin <i>et al.</i> [19]
K09	Japan	403	CFU			Karasudani <i>et al.</i> [11]
F13	Japan	43	CFU			Furuhata <i>et al.</i> [4]

^aDesignations for data sources used in figures, tables and descriptions of this study.

^bAbbreviations: TC, total coliforms; HPC, heterotrophic plate count; PCR, polymerase chain reaction specific to *Legionella* spp.; CFU, colony forming unit from plate cultures; MPN, most probable number from broth culture test.

구가 레지오넬라균을 자연수 또는 시설 용수에서 체계적으로 검출한 것으로 나타났고, 22개 연구에서 총대장균군과의 관계가 분석된 것으로 파악되었다. 그 중 온천수를 대상으로 한 조사를 취합한 결과, Table 1에서 제시된 바와 같은 7개의 환경조사 논문이 본 연구의 메타분석 대상으로 채택되었다. 국내 온천을 대상으로 한 조사결과는 없었으나, 대만, 일본, 중국으로 한국에 근접한 국가들의 화산지역의 온천수들이 주요 조사 대상이었다. 해당 연구들은 Fisher's exact test, logistic regression, chi-square test, Mann-Whitney U-test 등을 통하여 레지오넬라균 검출 유무를 총대장균군수 등의 수질변수에 대한 오즈비(odds ratio)로 보고하였거나, 환산 가능한 검출 빈도 자료를 게시하였으므로, 그 자료들에 기초하여 레지오넬라균 검출에 대한 오즈비로 여러 수질변수가 레지오넬라균 분포와 상관관계가 있는지를 메타분석할 수 있었다. 7개의 연구에서 레지오넬라균과 오즈비를 계산할 수 있는 공통된 자료로는 총대장균군수(TC)와 일반세균수(HPC), 수온이 있었다(Table 1).

메타분석

'체계적 고찰'이라고도 불리는 메타분석(meta analysis)은 기 발표된 연구의 결과에 나타난 특정변수들간의 수리적 관계의 측정량(효과크기: effect size)들에 연구들간의 차이점에 대한 무선효과(random effect)를 도입하여 종합함으로써 효과크기의 정도와 통계적 유의성을 검증하는 분석방법이다 [5]. 여러 수체(water body)에서 나타나는 효과크기의 일관된 경향성의 유무를 파악하거나, 각 수체별 또는 연구별 효과크기의 이질성을 정량할 수 있으므로, 수질기준과 같이 다양한 수체에 대하여 적용되어야 하는 역치의 유효성을 검증함에 적합한 것으로 사료된다. 메타분석을 위한 통계적 계산은 통계프로그램인 R에서 작동하는 'metafor' 패키지를 활용하였다[23]. 모든 통계적 검증에서 사용한 유의수준

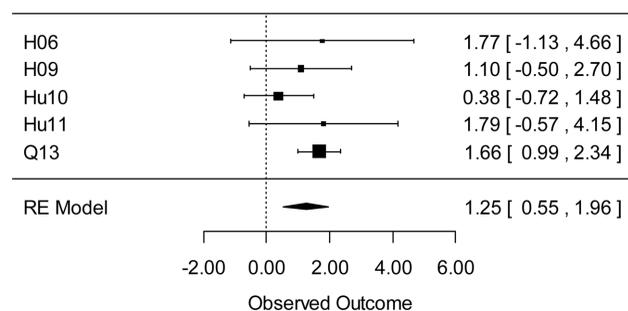


Fig. 1. Forest plot of log odds ratio (95% CI) of *Legionella* presence/absence against total coliform abundance. symbols: square, centered at the log odds ratio value estimated for an individual study with the side length as Mantel-Haenszel weight; horizontal lines, 95% CI; diamond, centered at the log odd ratio value estimated by meta-analysis with its 95% CI as the horizontal edges of the diamond.

은 $p < 0.05$ 이었다.

결 과

총대장균군과 레지오넬라균 분포의 상관성

Table 1의 선행연구 중 총대장균군수와 레지오넬라균 유무를 보고한 5개 연구를 대상으로 두 가지 세균군의 분포에 대한 오즈비를 메타분석하였고, 그 결과를 Fig. 1에 forest plot으로 표시하였다. Q13의 연구를 제외한 연구들에서 오즈비는 평균적으로 1보다 높았지만, 95% 신뢰구간 기준으로, 1과 유의하게 다르지는 않았다. Q13 연구의 경우, 100 ml 당 0.3 MPN 이상의 총대장균군이 온천수에 있는 경우 레지오넬라균이 검출 위해도가 5.3배 높았고, 그 신뢰구간은 2.7-10.4배로 1과 매우 유의하게 달랐다($p < 0.001$). 각 연구는 다른 종류의 수체에 대하여 수행되었고, 오즈비 계산에 있어 상이한 cutoff 값(0, 0.3, 10, 100 CFU/100 ml)을 사용하였기

Table 2. Odds ratios from meta-analyses for *Legionella* presence/absence when risk factors were above the cutoff values^a.

Risk factor	Cutoff	OR	SE	LCI	UCI	P
TC	0–100 CFU/100 ml	3.10	1.45	1.51	6.39	0.002
HPC	400–30,000 CFU/ml	4.00	1.35	2.22	7.22	<0.001
Temp	30–35°C	4.37	1.78	1.40	13.58	0.011
Temp	40°C	0.60	2.38	0.11	3.28	0.554
Temp	50°C	0.23	1.37	0.13	0.43	<0.001

^aAbbreviations: OR, odds ratio; SE, standard error of OR; LCI, lower confidence limit of OR at 95% confidence level; UCI, upper confidence limit of OR at 95% confidence level; P, probability from t-test on the null hypothesis of OR = 1; TC, total coliforms; HPC, heterotrophic plate count; Temp, water temperature.

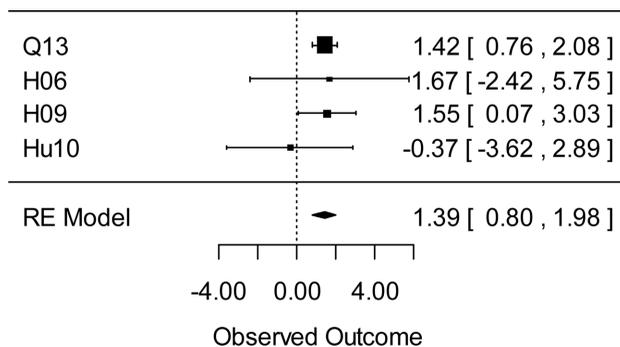


Fig. 2. Forest plot of log odds ratio (95% CI) of *Legionella* presence/absence against heterotrophic plate count.

때문에, 연구간의 상이성(heterogeneity)이 존재할 것으로 예상되었으나, 레지오넬라균이 검출되는 온천수의 경우 검출되지 않는 온천수에 비하여 총대장균군이 주어진 cutoff보다 대체로 높게 측정된다는 점에 대하여 상이성이 유의하지 않았다(test of heterogeneity by Q static, $p = 0.39$). 각 연구의 오즈비를 총합한 결과, 상대적으로 높은 수준의 총대장균군을 갖는 온천수에서 레지오넬라균의 검출 오즈가 3.1배 유의하게 높은 것으로 나타나서(Table 2), 개별 연구에서 유의하지 않을 수도 있지만, 보고된 자료의 공통적 특징으로, 총대장균군 지표가 환경유래 내열성 병원체인 레지오넬라균의 분포와 통계적으로 유의한 상관성이 있는 것으로 판단되었다.

일반세균수와 레지오넬라균 분포의 상관성

레지오넬라균은 분변 유래 세균이 아니므로, 비분변성 오염을 포함하는 세균 지표가 총대장균군 보다 레지오넬라균 검출과 더 높은 상관도를 가질 수도 있다. 기존 연구에서 레지오넬라균 유무와 함께 자주 보고되고, 국내의 수질기준항목으로 포함되기도 하는 일반세균수를 레지오넬라균 출현과의 상관도로 평가하였다. 4개의 개별연구 결과가 활용될 수 있었다. 오즈비의 계산에 사용된 HPC의 cutoff 값이 Q13의 경우 400 CFU/ml, H06과 Hu10의 경우 500 CFU/ml, H09

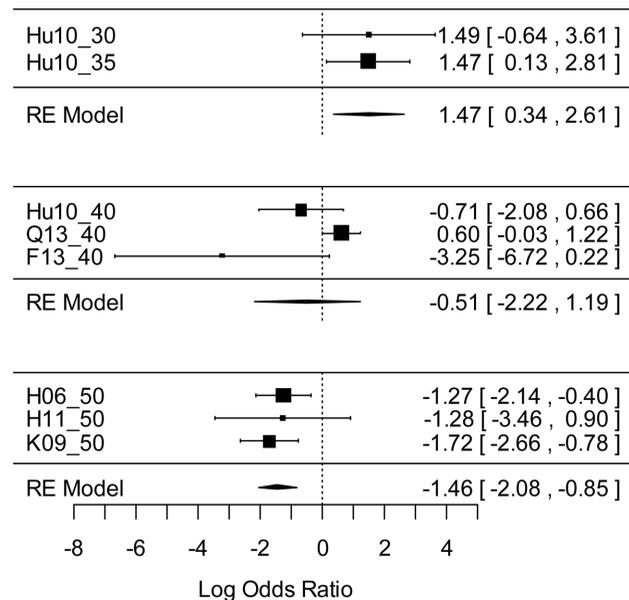


Fig. 3. Forest plot of log odds ratio (95% CI) of *Legionella* presence/absence against water temperature by three cutoff ranges. panels: top, cutoff $\leq 35^\circ\text{C}$; middle, cutoff $= 40^\circ\text{C}$; bottom, cutoff $= 50^\circ\text{C}$, codes: study codes in Table 1 followed by temperature cutoff value for odds ratio.

의 경우 30,000 CFU/ml로 상이하였으나(Fig. 2), 이질성 검증에서 효과크기의 이질성은 유의하지 않은 것으로 판정되었다($Q = 1.19$, $df = 3$, $p = 0.75$). 메타분석 결과, 레지오넬라균 검출 유무의 오즈비는 HPC가 높은 온천수에서 평균 4배 높은 것으로 나타났다(Table 2). 따라서, 일반세균수 또한 레지오넬라균의 검출과 상관도가 있었으며, 총대장균수보다 더 높은 상관도를 보였다.

수온과 레지오넬라균 분포의 상관성

온천수와 같이 25°C 이상의 다양한 수온을 가질 수 있는 수체들에서 레지오넬라균, 총대장균군, 일반세균이 서로 상관성을 보이는 현상의 기작으로 수온에 대한 세균들의 생장

를 또는 생존률이 공통적으로 영향을 받는 현상을 고려할 수 있다. 이 기작의 영향을 평가하기 위하여 온천수에서 레지오넬라균의 유무와 수온의 상관도를 메타분석으로 평가하였다. 레지오넬라균의 검출과 수온의 상관도를 본 6개 개별연구 사이의 이질성을 검정한 결과, 상당히 유의한 이질성이 확인되었다($p < 0.0001$). 따라서, 개별연구에서 사용된 자료들에서 레지오넬라균 검출 유무의 오즈비와 수온이 일관된 관계를 갖지는 않는 것으로 나타났다. 수온과 로그 오즈비의 관계를 검토한 결과, 로그 오즈비가 40°C 이하의 cutoff에서 양의 값, 40°C 이상의 cutoff에서 음의 값을 갖는 경향을 보였고, 수온과 로그 오즈비간의 상관계수를 측정하였을 때 유의한 수준의 높은 음의 상관도를 보였다(Spearman rank correlation, $\rho = -0.73$, $p = 0.04$). 이런 결과는 수온의 범위에 따라 레지오넬라균 검출 유무의 오즈비가 상이한 반응을 보이는 양태를 의미하므로, 3개의 수온 cutoff 범위를 설정하여, 각 범위별로 메타분석을 실시하였다(Fig. 3). Hu10 연구는 여러 온도를 cutoff로 설정하여 오즈비를 산정하는 것이 가능하였으므로, 3개의 cutoff를 갖는 경우를 각각 적용하였다. 35°C 이하의 cutoff가 적용되는 경우는 Hu10의 연구에서만 가능하였는데, 2개 cutoff의 적용에 대한 메타분석은 이질성이 거의 없었으며($p = 0.99$), 온도가 이들 cutoff 보다 높을 때, 레지오넬라 검출 유무의 오즈비가 4.37배에 달할 정도로 강한 상관성을 보였다(Fig. 3 top; Table 2). 반면, 50°C cutoff를 가진 3개 연구에 대하여 메타분석을 실시한 결과, 이질성이 없는 공통된 경향의 효과크기를 보이며($p = 0.78$), 레지오넬라 검출 유무의 오즈비가 0.23 수준으로 유의하게 낮으며, 50°C 이상의 수온에서 레지오넬라 검출 오즈가 그 이하의 수온에 비하여 1/4 수준으로 낮아지는 것으로 해석되었다(Fig. 3 bottom; Table 2). 40°C cutoff를 적용한 3개의 연구는 서로 이질성이 강한 효과크기를 보였고($p = 0.03$), 수온이 cutoff 이상일 때와 미만일 때의 레지오넬라 검출 오즈의 유의한 차이가 없었다(Fig. 3 middle; Table 2). 3개 범위의 cutoff를 적용한 메타분석의 결과를 종합하면, 40°C를 기준으로 그 미만의 온도 범위에서 레지오넬라균 검출은 수온과 양의 상관관계를 가지며, 그 이상의 온도에서 음의 상관관계를 보이는 것으로 해석되었다. 즉, 레지오넬라균은 <40°C의 온천수에서 수온이 높아짐에 따라 평균 4.4배 더 자주 검출되고, >40°C의 온천수에서 더 적게 검출된다는 점이다. 특히, >50°C 이상의 온천수에서 레지오넬라균 검출률은 그 이하 온도의 온천수에 비하여 1/4 수준으로 볼 수 있었다.

고 찰

온천수를 비롯한 지하수의 수질 관리에 대한 기준과 절차는 현재 14개의 법률에 의하여 정해져서 9개 정부부처에 의

하여 시행되는 것으로 알려져 있다[1]. 온천수는 취수원에 따라 지하수이므로 지하수 관리기준들이 적용되며, 사용목적에 따라 음용수, 목욕수, 기타 위락시설 용수로서의 수질기준이 적용된다. 온천법과 공중위생관리법은 온천수의 원수가 100 ml당 총대장균군이 불검출되어야 한다는 단일 미생물학적 위해성 관리기준을 갖고 있다. 온천수가 먹는 물로 사용된다면, 먹는물관리법의 적용을 동시에 받으므로, 일반세균, 분원성대장균, 분원성연쇄상구균, 대장균, 녹농균 등의 지표종과 살모넬라, 쉬겔라 등 병원성 세균에 대한 기준을 충족하여야 할 것이다. 온천수가 목욕수로 사용될 경우, 온천법과 공중위생관리법에 따라 100 ml 당 총대장균군이 1 CFU 이하로 검출되어야 한다는 것이 유일한 미생물학적 위해성 관리를 위한 수질기준이다. 그러나 총대장균군이라는 수질기준항목은 분변성 오염의 지표로 주로 간주되며, 분변이 아닌 다른 경로를 통하여 내열성 병원체가 유입되어 건강위해도를 보이는 경우를 고려하지 못한 것이다. 본 연구는 환경유래 내열성 병원성 세균인 레지오넬라균을 일례로 삼아, 총대장균군의 수에 대한 수질기준의 운용만으로, 현행 온천수 관리기준이 이런 위해도를 관리하는데 실효성이 있으며, 미래 기후변화 등의 추세로 발생하는 국민 보건환경의 변화상황하에서도 실효성을 유지할 수 있을 지 평가하였다.

본 연구의 결과, 100 ml 당 총대장균군수가 0-100의 cutoff 값을 갖는 레지오넬라균 검출유무 오즈비가 평균 3.1배이며, 유의한 수준으로 1과 차이가 났다(Fig. 1, Table 2). 따라서, 100 ml 당 총대장균군의 불검출 또는 1 CFU 이하의 검출률을 허용하는 현행 온천수 수질기준이 환경유래 내열성 병원체인 레지오넬라균의 관리에 실효성이 있는 것으로 평가된다. 그러나, 온천수에서 비분변성이면서 내열성이 높은 레지오넬라균에 의한 위해도를 상대적으로 낮은 내열성을 갖고 분변성 오염지표인 총대장균군이 현상적으로 반영할 수 있다는 점은 알려진 생물학적 현상에 의하여 단순히 설명되지 않는다. 법적 효력을 갖는 수질관리 기준으로 사용되기 위하여 그 기작을 탐구하여 현행 수질기준의 실효성을 이론적으로 정당화할 필요가 있다.

일반세균수(HPC)와 레지오넬라균 검출의 상관성이 또한 본 연구에서 유의하게 분석되었다(Fig. 2, Table 2). HPC의 레지오넬라균 검출유무 오즈에 대한 상관도는 총대장균군의 경우보다 다소 높았다. 레지오넬라균, 총대장균군, 일반세균 등 3개 세균 항목이 서로 유의한 상관도가 있고, 특히 일반세균과 레지오넬라균 검출의 상관도가 상대적으로 높다는 점은 전반적으로 일반세균의 수를 결정하는 인자가 일반세균의 부분집합인 레지오넬라균과 총대장균군의 동시에 결정된 것임을 시사한다. 한 수체에서 총세균수 또는 일반세균수를 결정하는 인자는 수체의 종속영양세균에 대한 수용능력을 의미하므로, 온천수의 세균에 대한 수용능력을 결정하는

어떤 인자가 많고 적음에 의하여 레지오넬라균과 총대장균군의 수가 함께 변동하여, 두 항목 간의 상관관계가 발생한 것으로 볼 수 있다. 이 점은 총대장균군 보다 일반세균수가 비분원성 병원체인 레지오넬라균의 검출률을 예측하는 변수로서 더 적합함을 의미한다. 본 연구에서 HPC가 TC보다 더 높은 OR을 보인 점은 이를 뒷받침한다(Table 2).

외국의 온천수에 대한 수질기준에 HPC가 포함되는 예들이 있다. 다수의 온천을 보유하고 목욕수로 주로 이용하는 대만의 경우, <500 CFU/ml의 기준을 온천수 수질기준에 포함시키고 있다. 반면 일본의 온천수 원수에 대한 규정은 HPC 기준없이 총대장균군 불검출의 기준만을 두고 있다. 이와 같이 각국에 따라 기준이 다른 현상은, 한 수체의 종속영양세균 수용능력을 시사하는 HPC가 목욕용 온천수 수질기준으로 더 적합할 수 있다는 본 연구의 결과와 함께, 온천수 중 HPC와 TC의 변동성과 지표로서의 기능에 대한 보다 주도면밀한 분석을 통하여, 보다 안정성이 높은 온천수 수질기준을 확립할 필요성이 있다는 점을 피력한다.

한 수체의 종속영양세균 수용능력은 영양물질의 양과 세균의 생장률 및 사망률의 평형에 의하여 결정된다고 볼 수 있다. 본 연구의 결과, 레지오넬라의 검출률이 수온의 범위에 따라 다르게 나타남이 보여졌고, 35°C 미만의 온천수보다 35°C 이상의 온천수에서 레지오넬라 검출률이 높은 점과 50°C 미만보다 50°C 이상의 온천수에서 레지오넬라 검출률이 더 낮아지는 점이 대비되었다. 이러한 결과는 50°C 미만 또는 40°C 미만의 온천수에서 레지오넬라균 수가 온도와 비례하여 분포하였으며, 50°C 이상의 온천수에서는 온도와 반비례하여 분포하였음을 시사한다. 본 연구에 사용된 다양한 온천수의 영양물질의 양이 크게 다르지 않았다고 가정한다면, 이와 같은 결과는 50°C 미만 또는 40°C 미만의 온천수에서 레지오넬라균은 온도에 따라 높은 생장률을 보이지만, 50°C 이상에서는 온도에 따라 높은 사망률이 갖게 된다는 것으로 해석될 수 있다. Furuhashi et al. [4]은 33–38°C 구간에서 레지오넬라수가 증가하는 양상과 40°C 이상에서 급감하는 현상을 관찰하였으며, Huang et al. [8]은 15–45°C 구간에서 레지오넬라 검출률이 점증하면서 45°C에서 최고 검출률을 보이고, 55°C에서 급감하는 분포를 관찰하였다. Karasudani et al. [11]은 45–50°C를 cutoff로 삼을 때, 그 이상의 수온에서 레지오넬라 검출유무 오즈가 낮아짐을 보고하였다. 자연적으로 가열된 온천수가 아니고, 인위적으로 가열된 온수의 경우에도 유사한 양태가 보고되었다. Serrano-Suaresz et al. [21]은 온수공급배관에서 수온이 25–65°C로 변화할 때, 수온과 레지오넬라균 검출률이 음의 상관도를 가진 것을 발견하였고($\rho = -0.34, p < 0.05$), Mathyis et al. [13]도 동일한 관계를 수온이 30–70°C인 온수배관에서 관찰하였다. 반면에 4–28°C의 낮은 온도의 냉각탑수를 분석한

Türetgen et al. [22]의 경우 *L. pneumophila*의 수가 수온과 정비례 관계를 가짐을 보고한 바 있다. 따라서, 수온이 약 40°C 보다 낮은 범위의 수체에서 레지오넬라에 대한 수용능력 또는 생장률이 수온에 비례하고, 수온이 50°C를 넘어서는 수체에서, 중온성 일반세균과 마찬가지로, 레지오넬라는 사멸하는 것으로 생각된다. 온천수에서 발견된 총대장균군과 레지오넬라, 그리고 일반세균과 레지오넬라균의 분포의 상관성은 수온에 대한 3가지 종류의 세균군의 반응이 유사하기 때문에 사료된다. 특히, 수온이 50°C를 넘어서는 고온에서 대체적으로 모든 세균의 사망률이 높아지는 현상 때문에 발생하는 것으로 생각될 수 있다.

국내의 온천은 비화산성 온천이라는 점이, 본 연구의 메타분석에 사용된 대만, 중국, 일본의 온천수와 차이점이라 할 수 있다. 국내의 비화산성 온천은 수온이 25–30°C로 낮은 편인 심부지하수형 온천과 35°C 이상의 수온을 보이는 잔류마그마형 온천으로 구분된다[15]. 국내 1,092개 온천공 중, 45°C 이상의 수온을 보이는 곳은 197개 공으로 약 18%에 불과하며, 77%의 온천공은 25–40°C의 수온을 보인다. 따라서, 총대장균군 및 일반세균수가 레지오넬라균 검출률과 상관도를 보이게 되는 고온의 화산성 온천수와 같은 종류의 상관관계를 보일지는 불확실하다. 25–40°C의 수온 범위에서 수온에 따라 총대장균군 및 내열성 일반세균, 레지오넬라균의 생장률이 결정된다면, 이들 세균 항목들은 서로 상관관계를 갖고, 검출방법이 다소 난해한 레지오넬라균의 검출보다, 총대장균군과 일반세균수에 의하여 국내 온천수의 수질을 관리하는 것이 적절한 방법이라고 할 수 있겠다. 그러나 본 연구에서 사용된 수집된 자료들 중에서 25–40°C의 온천수에서 측정된 자료를 선별하여 총대장균군 지표가 레지오넬라균 오염을 검출할 수 있을 지 메타분석이 가능하지 않았다. 대부분의 자료에서 자료가 보고된 형태가 선별된 일부 자료에 대한 오즈비를 계산하는 것이 가능하지 않았기 때문이다. 따라서, 국내 온천수의 대다수를 차지하는 심부지하수형 온천수의 미생물학적 안전성 담보를 위한 총대장균군 지표의 타당성은 별도의 실험적 연구를 실행하여야 평가될 수 있을 것으로 사료된다.

결론

본 연구의 결과, 온천수에서 분변성 오염의 지표인 총대장균군수가 3군 법정전염병으로 규정되고 환경유래 내열성 병원체인 레지오넬라균에 의한 위해도를 통계적으로 유의하게 감지할 수 있는 것으로 평가되었다. 비분변성 병원체인 레지오넬라균에 의한 위해도를 분변성 오염지표인 총대장균군이 현상적으로 반영할 수 있다는 점은 알려진 생물학적 현상에 의하여 단순하게 설명되지 않기에, 본 연구는 그 기작에 대

한 검토를 실시하였다. 레지오넬라균도 일반적인 중온성 중속영양세균과 총대장균군 세균들과 마찬가지로 40°C 이하의 온천수에서 온도에 비례하여 생존하고, 50°C 이상의 온천수에서 사망률이 높아지는 현상을 공통적으로 가지기 때문으로 나타났다. 따라서, 총대장균군은 레지오넬라균과 수온에 의하여 두 세균의 오염도가 결정되는 현상때문에 간접적 연관성을 가졌다. 이 기작에 따르면, 총대장균군보다 일반세균수가 더 직접적으로 온천수의 레지오넬라균을 비롯한 비분변성 병원체의 증감에 반응할 것으로 생각되므로, 총대장균군 보다 일반세균수를 단일 수질관리 기준으로 사용하거나, 현행 기준에 일반세균수를 추가하는 것이 타당한 것으로 판단된다. 단, 본 연구에서 고려된 병원체는 세균에 국한되며, 바이러스와 원생동물 등의 여타 종류의 병원체에 대하여 별도의 분석이 필요하다.

요 약

온난화, 고령화, 세계화로 인하여 변화하는 국내 보건환경에 현행 수질기준이 적합할 지 평가가 필요하다. 본 연구는 총대장균군만으로 규정된 현행 온천수 수질기준의 타당성을 환경유래 내열성세균인 레지오넬라균 오염도를 검출로 평가하였다. 온천수에서 레지오넬라균을 검출한 7개의 논문에서 보고된 미생물 자료에 대한 메타분석을 실시하였다. 레지오넬라균의 검출 유무의 오즈비는 총대장균군과 유의한 상관도를 보였다[odds ratio (OR), 3.1 (1.5–6.4, 95% CI), $p = 0.002$]. 그러나, 레지오넬라균 오염을 분변성 중온균인 총대장균군 지표가 감지할 수 있다는 점은 단순히 설명되지 않기에, 그 기작을 검토하였다. 레지오넬라균의 검출 유무는 일반세균수와 더 높은 오즈비를 보였고[4.0(2.2–7.2), $p < 0.001$], 40°C 미만의 수온범위에서 수온과 강한 상관도[OR, 4.3(1.4–13.6), $p = 0.011$], 50°C 이상에서는 수온과 음의 상관도를 보였다[OR, 0.2 (0.1–0.4), $p < 0.001$]. 따라서, 수온에 의하여 세균의 현존량이 결정되는 현상 때문에 총대장균군수와 레지오넬라균 유무가 연관성을 가진 것으로 판단된다. 이에 따르면, 총대장균군보다 일반세균수가 더 직접적으로 비분변성 병원체의 증감을 반응할 것으로 생각되므로, 일반세균수를 단일 수질관리 기준으로 사용하거나, 현행 기준에 일반세균수를 추가하는 것이 타당한 것으로 판단된다.

Acknowledgments

This study was carried out with the support of “Cooperative Research Program for Agriculture Science & Technology Development (Project No. PJ00941602)” Rural Development Administration, Republic of Korea.

References

- Ahn MS. 2011. Inter-department Integrated Guideline for Water Quality Conservation of Ground Water. Ministry of Environment, Sejong, Korea.
- CDC Korea. 2012. Guideline for Management of Legionnaires' Disease. Center for Disease Control and Prevention, Korea, Osong, Korea.
- Fliermans CB. 1983. Autecology of *Legionella pneumophila*. *Zentralbl. Bakteriol. Mikrobiol. Hyg. A*. **255**: 58–63.
- Furuhata K, Edagawa A, Ishizaki N, Fukuyama M. 2013. Isolation of *Legionella* species from Noyu (unattended natural hot springs in mountains and fields) samples in Japan. *Biocontrol Sci*. **18**: 169–173.
- Gruber JS, Ercumen A, Colford JM Jr. 2014. Coliform bacteria as indicators of diarrheal risk in household drinking water: systematic review and meta-analysis. *PLoS One* **9**: e107429.
- Hsu BM, Chen CH, Wan MT, Cheng HW. 2006. *Legionella prevalence* in hot spring recreation areas of Taiwan. *Water Res*. **40**: 3267–3273.
- Hsu BM, Lin CL, Shih FC. 2009. Survey of pathogenic free-living amoebae and *Legionella* spp. in mud spring recreation area. *Water Res*. **43**: 2817–2828.
- Huang SW, Hsu BM, Huang CC, Chen JS. 2011. Utilization of polymerase chain reaction and selective media cultivation to identify *Legionella* in Taiwan spring water samples. *Environ. Monit. Assess*. **174**: 427–437.
- Huang SW, Hsu BM, Wu SF, Fan CW, Shih FC, Lin YC, et al. 2010. Water quality parameters associated with prevalence of *Legionella* in hot spring facility water bodies. *Water Res*. **44**: 4805–4811.
- Hyun KR, Kang S, Lee S. 2015. Population aging and health-care expenditure in Korea. *Health Econ*. In press, DOI: 10.1002/hec.3209
- Karasudani T, Kuroki T, Otani K, Yamaguchi S, Sasaki M, Saito S, et al. 2009. *Legionella* contamination risk factors in non-circulating hot spring water. *Kansenshogaku Zasshi* **83**: 36–44.
- MacPherson DW, Gushulak BD, Baine WB, Bala S, Gubbins PO, Holtom P, et al. 2009. Population mobility, globalization, and antimicrobial drug resistance. *Emerg. Infect. Dis*. **15**: 1727–1732.
- Mathys W, Stanke J, Harmuth M, Junge-Mathys E. 2008. Occurrence of *Legionella* in hot water systems of single-family residences in suburbs of two German cities with special reference to solar and district heating. *Int. J. Hyg. Environ. Health* **211**: 179–185.
- Ministry of Environment. 2013. Results from Water Quality Surveillance on National Ground Water Monitoring Network in 2012. Incheon, Korea.
- Ministry of Government Administration and Home Affairs. 2007. Study on Conservation Measures for Ground Water Resources. Seoul, Korea.

16. Park MS, Kim YS, Lee SH, Kim SH, Park KH, Bahk GJ. 2015. Estimating the burden of foodborne disease, South Korea, 2008-2012. *Foodborne Pathog. Dis.* **12**: 207–213.
17. Patz JA, Olson SH. 2006. Climate change and health: global to local influences on disease risk. *Ann. Trop. Med. Parasitol.* **100**: 535–549.
18. Pera A, Campos C, López N, Hassouneh F, Alonso C, Tarazona R, *et al.* 2015. Immunosenescence: Implications for response to infection and vaccination in older people. *Maturitas*. in press. doi: 10.1016/j.maturitas.2015.05.004.
19. Qin T, Yan G, Ren H, Zhou H, Wang H, Xu Y, *et al.* 2013. High prevalence, genetic diversity and intracellular growth ability of *Legionella* in hot spring environments. *PLoS One* **8**: e59018.
20. Rural Development Administration, Republic of Korea. 2007. Water Curtain Cultivation Technology for Green House. Suwon, Korea.
21. Serrano-Suárez A, Dellundé J, Salvadó H, Cervero-Aragó S, Méndez J, Canals O, *et al.* 2013. Microbial and physicochemical parameters associated with *Legionella* contamination in hot water recirculation systems. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* **20**: 5534–5544.
22. Türetgen I, Sungur EI, Cotuk A. 2005. Enumeration of *Legionella pneumophila* in cooling tower water systems. *Environ. Monit. Assess.* **100**: 53–58.
23. Viechtbauer, W. 2010. Conducting meta-analyses in R with the metafor package. *J. Stat. Software* **36**: 1–48.
24. Wang CM, Wang ET, Chen JH, Liu DP. 2012. An epidemiological analysis of Legionnaires' disease. *Taiwan Epidemiol. Bull.* **28**: 161–168.