

경기도내 먹는물 공동시설의 수질 개선방안 조사

최필권[†] · 허평 · 이경희 · 조덕희 · 김창규 · 김태화

경기도보건환경연구원 먹는물검사팀

Study on Water Quality Improvement in Public Drinking Water Facilities in Gyeonggi-do

Phil-kweon Choi[†], Pyung Huh, Kyong-hee Lee, Deok-hee Cho,
Chang-gyu Kim, and Tae-hwa Kim

Department of Water Environmental Research, Gyeonggi-do Institute of Health and Environment, Suwon 16205, Korea

Received June 10, 2018/Revised July 6, 2018/Accepted August 21, 2018

In this study, mineral springs were monitored to determine whether they are being contaminated by rainfall onto microorganisms. In addition, the sterilization efficiency of an ultraviolet sterilizer used in various mineral springs was investigated. It was observed that the incongruity rates of total coliforms, fecal coliforms, and heterotrophic plate counts were 64.8%, 20.1%, and 11.4% respectively. In July, when rainfall was high, the incongruity rates of microorganism-related characteristics were at their highest (76%), suggesting that changes in precipitation were directly related to incongruity rates of microorganism-related characteristics within mineral springs. A T-test result of 0.002 ($p < 0.05$, significant, 2-tailed) between the clay contents of soil in the valley and those of a control soil suggested that the possibility of underground penetration of soil in the valley is higher than that of general soil. Results of the sterilization test showed that *E. coli* was inactivated at the time of contact with an ultraviolet intensity of $10,000 \pm 20 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ for at least 3 seconds and no photorecovery was observed.

Key words: Mineral spring, Ultraviolet, Sterilization efficiency, Precipitation, t-test

1. 서 론

지구상에 분포하는 물 중에는 해수가 97.2%, 빙하가 2.2%를 차지하고 하천이나 호소의 형태로 지표에 부존하는 담수는 0.02%에 지나지 않으며 그 중 0.61%는 지하수로 부존되어 있으며 그 중 일부가 약수의 형태로 존재한다.¹⁾

약수란 오염되지 않은 자연 그대로의 물을 뜻하며 건강을 유지하는데 도움이 되는 물로 본래는 자연적으로 형성되어 땅 속에서 용출되는 샘물 중에서 중탄산, 공형물질 및 각종 미네랄 성분 등을 적당량 함유한 용천수를 말한다.^{2,3)}

산업발전에 따른 환경오염으로 수돗물에 대한 불신과

깨끗하고 안전한 물에 대한 관심이 가중되면서 약수터를 이용하는 이용객 수는 지속적으로 증가하는 추세에 있으나 주변 환경의 오염과 등산객으로 인한 오염의 영향을 받고 있으며 미생물에 의한 추가오염 또한 발생할 수 있고 세균은 유·무기 오염물을 세균 표면에 부착시켜 지하수 오염을 가속할 수 있는 것으로 알려져 있다^{4,6)}.

이와 관련하여 미생물에 의한 지하수 오염원으로 여겨지는 많은 점오염원에 대한 조사가 진행되어 왔으나⁷⁻¹⁰⁾ 지하수위의 영향을 받는 포화 대수층(saturation aquifer) 내로의 미생물 이동에 대한 연구에 한정되어 있고 지하수위 상부의 불포화대수층(vadose zone)으로 이동되는 미생물 이동 메커니즘에 대한 연구는 많이 부족하다¹¹⁾.

2015년 환경부 보도자료¹²⁾에 따르면 2014년 전국 먹

[†]To whom correspondence should be addressed.

Tel: , Fax: , E-mail:

는물공동시설 중 약 31.8%의 시설이 음용 부적합으로 판정되었으며 오염의 주 항목이 미생물 항목에 집중(97.0%)되어 있으나 미생물 오염경로에 대한 뚜렷한 해석이 부족하고 미생물에 의한 약수터 오염상황의 개선은 모연하다. Stotzky¹³⁾가 이러한 지표 오염물의 지하수 이동과 관련하여 조사한 바에 따르면 강우는 세균의 토양 내 침투속도를 증가시키는 것으로 조사된 바 있으며 토양으로의 오염물 이동에 관여하는 많은 파라메타(soil parameters, climate logical parameters, etc.) 중 토양 수분함량(soil-water content), 토양구조(soil structure), 토성(soil texture)은 토양 내 유-무기 오염물의 이동 및 자연 메카니즘에 중요한 영향요인으로 작용하는 것으로 알려져 있다. 또한 Huysman¹⁴⁾ 등에 따르면 토양의 용적밀도(bulk density) 같은 물리적 특성은 토양의 다공성(porosity)과 공극 분포(pore size distribution)에 대한 영향으로 세균의 이동성에 영향을 주는데 용적밀도(bulk density)가 높을수록 조대공극(macropore)의 부피는 감소되어 상응하는 만큼 세균의 이동성을 저하시킨다. 이러한 영향요인들을 고려하여 본 연구에서는 강우에 의한 세균의 지하수 이동과 토양의 구조 및 특성에 따른 세균의 지하수 침투 가능성을 확인하기 위하여 이화학적 조사와 통계적 분석결과를 통하여 확인하고자 하였다.

강우에 의한 약수터 수질 저하 여부를 알아보기 위해 2017년 연간 강수량과 약수터 수질 부적합을 간의 관련성을 분석하였으며 통계패키지를 이용하여 강수량의 증가가 미생물에 의한 약수터 수질 저하에 영향을 미치는지에 대한 유의성을 검토하였다. 또한 토양 중에 조대입자 함량이 낮고 점토함량이 높을수록 오염물의 지하침투 속도가 느려지는 점을 고려하여 t-검증을 통해 약수터의 상부 V자 계곡부 토양과 대조군 토양의 토성 및 점토함량 간의 유의한 차이를 증명하고 약수터 상부 V자 계곡부 또는 지표면보다 낮은 상습 침수지역으로부터 오염물의 지하침투 가능성을 확인하고자 하였다. 이와 더불어 미생물 항목의 약수터 수질오염 제어를 위해 주로 이용되는 자외선 살균기(UV sterilizer)의 살균능 검증을 위해 UV 광세기 및 조사시간에 따른 살균효율 시험을 실시하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 강우에 의한 약수터 오염여부 조사

봄, 가을 그리고 강우가 집중되는 강우기 약수터 오염 특성을 알아보하고자 경기도내 349개 약수터를 대상으로

먹는물 공동시설 관리 요령¹⁵⁾에 따라 2017년 4회 분기별 수질오염도 검사를 실시한 결과 중 미생물 항목(일반세균, 총대장균군, 분원성대장균군)에 대한 부적합 현황과 2017년 경기도 강수량 자료¹⁶⁾와 비교해보았으며 SPSS PASW Statistics 18.0을 이용하여 강수량(시료채취일 전 5일간 시, 군별 강수량의 합)과 적합, 부적합 판정 결과와의 비모수적 검정, 독립표본 t-검정을 통해 강우에 의한 수질오염 여부에 대한 유의성을 분석하였다.

2.2. 토성분석 및 점토함량 비교

약수터 상부 V형 계곡부로부터 지표수 지하 침투로 인한 약수터 수질 오염 가능성을 확인하기 위하여 미생물 항목의 부적합율이 지속적으로 높게 나타나고 약수터 상부가 V자 계곡형 또는 지표면보다 낮은 상습 침수 지역으로서 우수 등에 의한 표면 오염물의 지하 침투가 우려되는 10개 지점의 약수터를 선정하여 약수터 상부 계곡부 토양 및 주변 대조군(V형 계곡부로부터 5 m 격리) 토양을 각각 300 g 씩 토양오염공정시험기준¹⁷⁾에 따라 채취하여 약수터 별 각 2종의 토양에 대한 토성(soil texture)을 건당 3회에 걸쳐 반복 분석하였으며 시험방법은 미국 농무성법에 의한 토성삼각도(soil textural triangle)를 적용하여 구분하였으며 그 결과를 이용하여 계곡부 토양과 대조군 토양간의 특성을 비교하고 모래 함량은 높고 점토함량이 낮을수록 오염물의 지하침투가 용이함¹⁴⁾을 고려하여 계곡부 및 대조군 토양 중 점토함량의 통계적 차이를 확인하기 위해 SPSS PASW Statistics 18.0을 이용 독립표본 t-검정을 실시하였다.

2.3. 자외선 살균효율 조사

많은 시, 군 약수터에서 살균목적으로 설치되고 있는 UV-살균기의 미생물에 대한 살균효율을 검증하고자 살균소독제에 대한 유효성을 평가하는 지표미생물로 이용되는 대장균 표준균주(OXOID, EZ-CFU *E. coli* ATCC 25922)를 사용하였다. 동결건조 표준균주 펠렛 10개를 10 mL 수화액(hydrating fluid)에 녹여 34~38°C에서 30분간 배양한 후 인산염 완충액(pH 7.2) 40 mL에 전량 주입하고 이 시료($1.72 \times 10^3 \pm 100$ CFU/mL)를 각 1 mL씩 분취하여 3개의 페트리 접시에 넣고 광세기 및 접촉시간을 달리하여 자외선을 조사하였다(Table 1). 자외선 조사가 끝난 즉시 각각의 페트리 접시에 표준 한천배지(plate count agar)를 10~12 mL씩 주입, 혼합하여 (35 ± 0.5)°C에서 (48 ± 2)시간 배양한 후 형성된 집락수를 계수하였으며 그 결과는 3개의 평균값으로 표시하였다.

Table 1. Experimental condition for disinfection efficiency of *E. coli* by contact time and UV light intensity

UV Light Intensity ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	10,000 \pm 20	5,000 \pm 20
Cell counts in 35°C (CFU/mL)	1.72 \times 10 ³ \pm 100	
Contact Time (sec)	0.5	
	1	
	2	
	3	
	30	
	60	
	180	

UV 램프가 장착된 Test Module은 254 nm의 파장에서 10,000 \pm 20 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 및 5,000 \pm 20 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 의 광세기가 유지되도록 시료 접촉부위와의 거리를 조절한 후 조사하였으며 광세기는 UV Detector(UVX Radiometer, UVP Co.)로 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 약수터 수질검사 항목별 부적합 현황

약수터 이용과 관련한 주요 관심사 중의 하나는 병원성균으로 인한 약수터 오염문제이다. 해당 시, 군에서 먹는물 공동시설 관리요령에 따라 약수터 수질관리를 실시하고 있으나 경기도내 349개 약수터를 대상으로 먹는물 수질검사를 실시한 결과 연간 부적합율은 32.0%를 웃돌고 있으며 그 중 미생물 항목이 96.3%로서 전체 부적합의 대부분을 차지하였다. 항목별 부적합 내역(Fig. 1)을 보면 총대장균군 64.8%, 분원성대장균군 20.1%, 일반세균 11.4% 등의 순으로 나타났으며 그 결과를 볼 때 병원성균에 의한 약수터 수질의 위험은 내재되어 있는 것으로 조사되었다.

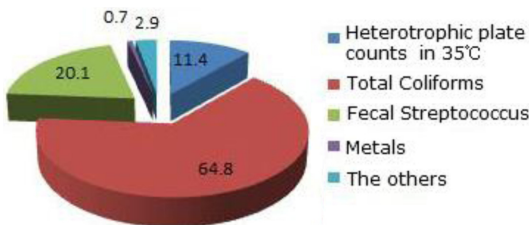


Fig. 1. Incongruity rate for water quality of public drinking water facilities in Gyeonggi-do in 2017.

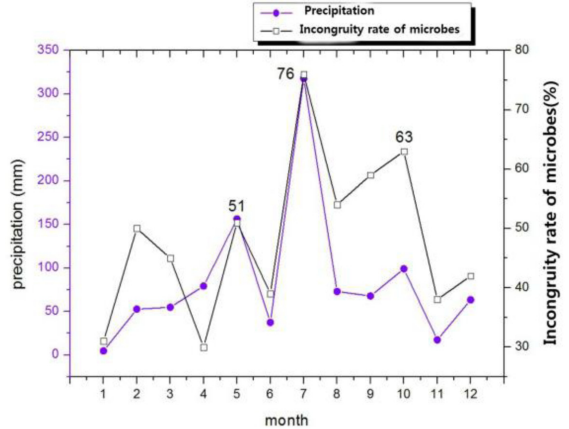


Fig. 2. Precipitation and monthly incongruity rate of microbes in Gyeonggi-do in 2017.

3.2. 강우에 의한 약수터 오염여부 조사

강우에 의한 약수터 수질오염 영향 여부를 판단하고자 2017년 약수터 수질오염도 검사결과 중 미생물 항목의 부적합율과 2017년 경기도 강수량 자료와 비교해 본 결과는 Fig. 2와 같다. 강우가 집중된 7월에 미생물 항목의 부적합율이 76%로서 가장 높게 나타나고 있으며 봄(5월), 가을(10월)에 51%, 63%로서 강수량이 높을 때 부적합율이 상승하는 경향을 볼 수 있으며 강수량과 약수터 수질오염간의 연관성을 엿볼 수 있다.

이와 더불어 강우에 의해 지표면의 미생물 등이 지하수로 유입되는지 여부를 통계적으로 검정해 본 결과는 Table 2와 같다.

강수량(시료채취일 전 5일간 시, 군별 강수량의 합)과 적합, 부적합 판정 결과와의 독립표본 t-test 결과 유의 확률 0.000 ($p < 0.05$, Significant, 2-tailed)으로 통계적으로 유의한 결과를 보임으로서 강수량의 변화에 따른 약수터 미생물 항목의 적부 판정 결과는 직접적으로 연관이 있는 것으로 분석되었다.

동일한 요인에 대하여 비모수적 검정을 실시한 결과

Table 2. Independent t-test and non-parametric test for monthly incongruity rate of microbes and precipitation

Classification	Incongruity rate of microbes	
	Independent t-test	0.000 ($p < 0.05$)
Precipitation	Non-parametric test	0.000 ($p < 0.05$)
		significant (2-tailed)

Table 3. Soil characteristics for the control and soil below V-shape valley upper part of public drinking water facilities

Facilities	Soil below V-shape valley				Control			
	Sand (%)	Clay (%)	Silt (%)	Soil Texture	Sand (%)	Clay (%)	Silt (%)	Soil Texture
A	86.0	9.9	4.1	Sand	83.7	16.1	0.2	Sandy Loam
B	72.6	8.0	19.4	Sandy Loam	65.3	26.5	8.2	Sandy Clay Loam
C	62.5	15.6	21.9	Sandy Loam	58.9	33.0	8.1	Sandy Clay Loam
D	76.1	2.0	21.9	Loamy Sand	66.0	29.5	4.5	lay Loam
E	92.4	1.0	6.6	Sand	83.4	16.5	0.1	Sandy Loam
F	72.7	8.0	19.3	Sandy Loam	71.2	25.6	3.2	Sandy Clay Loam
G	81.0	11.3	7.7	Sandy Loam	70.6	26.9	2.5	Sandy Clay Loam
H	62.4	12.3	25.3	Sandy Loam	61.2	36.0	2.8	Sandy Clay
I	75.4	20.0	4.6	Sandy Clay Loam	58.5	36.0	5.5	Sandy Clay
J	87.0	1.0	12.0	Sand	79.5	20.0	0.5	Sandy Clay Loam

또한 유의확률 0.000 ($p < 0.05$, Significant, 2-tailed)으로서 두 가지 분석결과를 종합해 볼 때 강수량이 많은 때 미생물 항목들에 의한 약수터 수질저하는 직접적으로 영향을 받을 수 있다고 판단 가능하다.

이러한 결과는 미생물 등의 이동속도는 토양 내 물의 흐름이 빠르게 진행될 수 있는 대형 공극(bigger pores)에서 더 높게 나타나며¹³⁾ 강우, 경작 등에 의한 물의 유입에 따라 토양 내 대공극(macropores; 75 μm 이상)을 통한 미생물 등의 이동이 쉽게 일어날 수 있다는 Nat-sch¹⁸⁾의 실험 결과에 의해서도 확인되었다.

3.3. 토성분석 및 지표수 지하침투 여부 조사

약수터 상부 V형 계곡부로부터 지표수 지하 침투로 인한 약수터 수질 오염 가능성을 확인하기 위하여 미생물 항목의 부적합율이 지속적으로 높게 나타나고 약수터 상부가 V자 계곡형 또는 지표면보다 낮은 상습 침수 지역으로서 우수 등에 의한 표면 오염물의 지하 침투가 우려되는 약수터의 상부 계곡부 토양 및 주변 대조군(V형 계곡부로부터 5m 격리) 토양의 토성(soil texture)을 분석한 결과는 Table 3과 같다.

김 등¹⁹⁾이 우리나라 전 지역 산림 토양의 토성을 분석한 결과는 양토(loam) 29%, 식양토(clay loam) 22.9%, 사양토(sandy loam) 18.3% 순으로 나타났는데 본 연구에서는 김 등의 연구결과와 비교해보았을 때 대조군의 경우 뚜렷한 차이를 보이지 않으나 V형 계곡부 토양의 경우 모래의 함량이 많고 점토함량이 적은 사토(sand), 사양토(sandy loam)가 주종으로서 우수기에 토양 표층의 유기물 등 표토가 많이 침식될 수 있으며 이로 인해 미세입자는 줄고 조대입자(coarse particle) 함량은 높아져 V형 계곡부의 토양 공극율(porosity)은 원래보다 점

점 더 높아져 우수의 지하 침투가 더 용이해질 것으로 판단된다. 이와 관련하여 Stotzky¹³⁾에 따르면 강우는 이온농도 저하에 의해 세균의 토양표면 부착력을 약화시키고 지하 침투율을 증가시키게 되며 토양 표면에 부착된 세균 등은 우수에 의해 토양입자 표면의 표면장력을 극복할 수 있는 충분한 에너지를 가지지 못하고 토양내 하부 공극을 통해 하강하는 등 침투율이 증가하는 것으로 보고한 바 있다. 또한 점토는 미생물 등의 이차적인 흡착(adsorption) 장소이며 점토함량이 높은 토양의 경우 모래 함량이 높은 토양에 비해 훨씬 더 미생물 등에 대한 흡착력이 높은 것으로 보고하였다.

이러한 점을 고려하여 계곡부분 토양이 일반 토양에 비해 미생물 등에 의한 지하로의 침투 가능성이 현격히 높다는 점을 확인하기 위하여 계곡부 및 대조군 토양 중 점토함량의 차이를 T-검정한 결과는 Table 4와 같다.

독립표본 T-검정 결과 유의확률 0.002 ($p < 0.05$, Significant, 2-tailed)으로서 계곡부분 토양과 대조토 토양의 점토(clay) 함량간의 차이는 뚜렷하며 계곡부분 토양이 일반 토양에 비해 지하로의 침투 가능성이 현격히 높다고 판정되었다.

3.4. 자외선 살균 효율 조사

UV-살균기의 살균효율을 검정하고자 분원성대장균 표준균주를 사용하여 램프의 광세기 및 접촉시간별 자외

Table 4. Independent t-test for control and soil below V-shape valley upper part of public drinking water facilities

Classification	Soil below v-shape valley
Control	0.000 ($p < 0.05$) Significant (2-tailed)

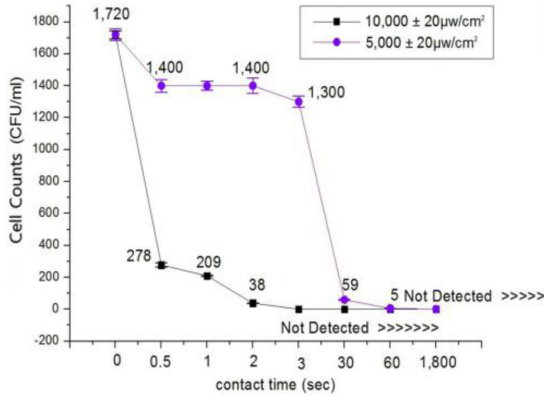


Fig. 3. The disinfection efficiency of *E. coli* according to contact time and UV light intensity.

선 조사 후 배지위에 생성된 집락수를 계수한 결과는 Fig. 3과 같다.

자외선 강도 $5,000 \pm 20 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 에서는 3초 이하의 짧은 접촉시간에서 살균 효과가 거의 관찰되지 않았고 30분 이상 접촉한 후부터 불활성화되었으며 자외선 강도 $10,000 \pm 20 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 에서는 접촉시간 3초 이상에서 불활성화되는 것으로 조사되었다.

자외선 강도 $10,000 \pm 20 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 에서 살균의 시작과 동시에 급격히 살균작용이 시작되고 있으나 완전 불활성화가 이루어질 때까지는 다소간의 접촉시간이 필요하며 안전한 약수물 확보를 위해서는 $10,000 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 이상의 강도로 최소 3초 이상의 접촉시간이 유지되어야 하며 $5,000 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 이하의 접촉시간으로는 미생물에 의한 약수터의 안전성을 확보하기 어려운 결과로 나타났다.

이와 같은 결과로 볼 때 빠른 유속의 연속적 흐름을 갖는 관입형 UV-살균기의 경우 충분한 자외선 강도 또는 접촉시간을 유지하지 못할 경우 충분한 살균 효과를 유지할 수 없으며 비교적 체류시간이 긴(30분 이상) 침수형 살균기의 경우 충분한 접촉시간이 유지되어 상대적으로 유리할 것으로 판단된다.

4. 결 론

강우에 의한 미생물 항목에 대한 약수터 오염 여부를 확인하고 많은 약수터에서 사용중인 UV-살균기의 살균 효율을 조사한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 먹는물 수질검사 항목별 부적합 내역을 보면 총대장균군 64.8%, 분원성대장균군 20.1%, 일반세균 11.4%

등의 순으로 나타났으며 미생물 항목이 96.3%로서 전체 부적합의 대부분을 차지하였다.

2. 미생물 부적합율은 강우가 집중된 7월에 76%로서 가장 높게 나타났으며 강수량의 변화에 따른 약수터 미생물 항목의 적부 판정 결과는 직접적 연관성이 있는 것으로 분석되었다.

3. 계곡부분 토양이 일반 토양에 비해 미생물 등에 의한 지하로의 침투 가능성이 훨씬 높다는 점을 확인하기 위한 독립표본 T-검정 결과는 유의확률 0.002 ($p < 0.05$, Significant, 2-tailed)으로서 계곡부분 토양과 대조토 토양의 점토(clay) 함량간의 차이는 뚜렷하며 일반 토양에 비해 지하로의 침투 가능성이 현격히 높은 것으로 판정되었다.

4. 적정 살균조건 도출을 위한 살균실험 결과 램프강도 $10,000 \pm 20 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, 최소 3초 이상의 접촉시간에서 대장균을 불활성화 할 수 있었으며 광회복 현상은 없는 것으로 확인되었다.

도내 약수터의 주 오염원인은 강우에 의한 지표수 유입인 것으로 조사되었다. 이와 관련하여 약수터 주변 청결유지 등 지속적인 관리가 기본적으로 필요하며 병원성균에 의한 오염방지를 위해서는 UV-살균기의 설치가 궁극적으로 필요하다고 판단된다. 부가적으로 관리자는 살균기 램프 및 관련 시설의 적극적 관리와 살균기 접촉시간 유지 등 시설관리 요령에 대한 기본 지식이 필히 요구되며 살균기 설치 및 관리에 대한 적극적 지원과 해당 시, 군에서의 관심과 관리 의지가 필수적인 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 한정상. “지하수학 개론”, 박영사, 1983, 11-16.
2. 유의형. “광천수의 성분분석 및 규격기준에 관한 연구”, *식품산업*, 1989, 27-31.
3. 민병준, “한국의 약수”, 대원사, 1997, 321-323.
4. 이성호 외 7인. “화학적·미생물학적 수질에 대한 강우영향의 특성(대구지역 약수)”, *대한환경공학회지*, 2002, 24, 2213-2225.
5. H. C. Choi and M. Y. Corapcioglu, “Transport of a non-volatile contaminant in unsaturated porous media in the presence of colloids”, *Journal of Contaminant Hydrology*, 1997, 25, 29-324.
6. S. Kim and M. Y. Corapcioglu, “A kinetic approach to modeling mobile bacteria-facilitated groundwater contaminant transport”, *Water Resources Research*, 1996, 32, 321-331.

7. J. E. Saiers and G. M. Hornberger, "Modeling bacteria-facilitated transport of DDT", *Water Resources Research*, **1996**, 32, 1455-1459.
8. F. Malard, J. L. Reygrobellet and M Soulie, "Transport and retention of fecal bacteria at sewage-polluted fractured rock sites", *Journal of Environmental Quality*, **1994**, 23: 1 35263.
9. L. W. Stewart and R. B. Reneau, "Movement of fecal coliform bacteria from septic tank effluent through coastal plain soils with high seasonal fluctuating water tables", *American Society of Agricultural Engineers*, **1982**, 31. 9-27 49085.
10. P. W. Westerman, R. L. Huffman and J. S. Feng, "Swine-lagoon seepage in sandy soil", *Transactions of the ASAE*, **1995**, 38, 1749-1760.
11. Adrian Unc, "Transport of fecal bacteria from manure through the vadose zone", **1999**, pp. 9. ADRIAN UNC, Canada.
12. 환경부, <http://www.me.go.kr/home/web/index.do?menuId=286>, **2015**.
13. G. Stotzky, "Mechanisms of adhesion to clays, with reference to soil systems in Bacterial adhesion: Mechanisms and physiological significance". **1985**, 195-254, ed. D.C. Savage and M. Fletcher.
14. F. Huysman and W. Verstraete, "Water-facilitated transport of bacteria in saturated soil columns: Influence of cell surface hydrophobicity and soil properties". *Soil Biology & Biochemistry*, **1993**, 25, 83-90.
15. 환경부, "먹는물공동시설 관리요령", **2015**.
16. 기상청, http://www.weather.go.kr/weather/climate/past_cal.jsp, **2017**.
17. 환경부, "토양오염공정시험기준", **2017**.
18. A. Natsch, C. Keel, J. Troxler, M. Zala, N. Von Albertini and G. Defago, "Importance of preferential row and soil management in vertical transport of a biocontrol strain of *Pseudomonas fluorescences* in structured fields", *Applied and Environmental Microbiology*, **1996**, 62, 33-40.
19. 김동호, 임수길, 이민효, "산성강하물 피해예상 산림토양의 이화학적 특성과 산성우에 의한 토양의 화학성 변화", *한국토양환경학회지*, **1996**, pp. 142.