

수돗물 배급수 계통의 유리잔류염소농도에 따른 종속영양세균의 거동에 관한 연구

윤태호* · 이윤진† · 이옥재* · 이의광* · 김 현 · 이동찬 · 남상호
건국대학교 환경공학과, *서울시 수도기술연구소 수질연구부 수질관리과

Heterotrophic Bacteria in Terms of Free Chlorine Residuals in water Distribution Systems

Tae Ho Yoon* · Yoon Jin Lee† · Ok Jae Rhee* · Euk Wang Lee* · Hyun Kim ·
Dong Chan Lee · Sang Ho Kim

Dept. of Environmental Engineering, Konkuk University

*Water Technology Research Institute Seoul Metropolitan Government, Water Quality Research Division
(Received 5 June, 2002; Accepted 5 August, 2002)

ABSTRACT

This study was to observe the occurrence of heterotrophic bacteria in terms of free chlorine residuals in two different water distribution systems belong to both K and Y water treatment plant. The data analyzed in this study showed that in distribution systems(DS), the free chlorine residuals were decreased from 0.10 to 0.56 mg/l for K, and 0.51 and 0.78 mg/l for Y. The decay of free chlorine were clearly higher in both March and August than those in January. The HPC in DS were ranged from 0 to 40 CFU/ml for K, 0 to 270 CFU/ml for Y, on R2A medium. In particular, Its level was relatively high at consumers' ground storage tanks, taps and point-of-end area of Y. The predominant genera found in the distribution systems were *Acinetobacter*, *Sphingomonas* (branch of *Pseudomonas*), *Micrococcus*, *Bacillus*, *Staphylococcus*. The diversity of heterotrophic bacteria was increased in the end-point area. Most of them were either encapsulated cells or cocci of gram-positive. In conclusion, the point-of-end area in distribution systems showed that the longer flow distance from WTP, the greater diversity and higher level of heterotrophic bacteria due to the significant decay of free chlorine residuals.

Keywords : Heterotrophic bacteria, Chlorine residuals, Distribution systems

I. 서 론

정수 처리된 물이 배급수 계통을 거치는 과정에 있어서 관의 부식, 미생물에 의한 오염 등의 문제가 발생할 경우 안전한 수돗물을 공급할 수 없게 된다. 따라서 양질의 수돗물을 공급하기 위해서는 단순히 원수의 수질 관리와 정수처리공정의 개선 뿐만 아니라 정수장에서 배수지 등을 거쳐 가정 수도까지의 일련의 과정 즉, 배급수 계통의 수질관리가 체계적으로 이루어져야 한다.¹⁾

배급수 계통에서의 오염원은 주로 개방형 정수지, 자

유수면이 존재하는 배수지, 파손 및 오염된 관을 통해 유입되어 수질을 악화시킨다.²⁾ 최근 정수장에서는 검출되지 않던 세균이 가정의 수돗물에서 과다하게 검출되는 사례가 다수 보고되고 있는데, 그 원인으로 미생물의 재성장³⁾에 의한 문제가 제시되고 있다.^{3,4)}

정수장에서 공급된 수돗물이 배급수관을 통하여 흐르면서 세균의 수가 갑자기 증가하는 현상을 미생물의 '재성장' 혹은 '후성장'이라고 부른다. 일반적으로 재성장³⁾과 후성장⁴⁾은 거의 같은 의미로 사용되고 있으나 세균의 증식 메커니즘에 따라 구별하여 정의하는 경우도 있다. Brazos와 O'Conner(1989)는 재성장을 소독제에 의하여 손상받은 세균이 상수도 관망에서 유입되어 회복되는 것으로, 후성장을 상수도관 표면에 정착한 세균이 증식하는 것으로 정의하고 있다. 미생물의 재성장은 성

†Corresponding author : Dept. of Environmental Engineering, Konkuk University
Tel: 02-447-8367, Fax: 02-447-8367
E-mail: yjlee@konkuk.ac.kr

장에 유리한 특정조건이 배급수 계통 내에 형성되거나, 외부에서 직접 유입되는 경우 또는 소독공정에서 불활성화되지 않고 배급수관 내벽에서 생물막을 형성하는 경우에 발생된다.⁵⁾

정수처리 공정에서의 소독이 수인성 질병을 유발하는 미생물을 불활성화시키는 것이라면, 배급수 계통에서 유리잔류염소의 농도를 유지시키는 것은 지역적인 수질오염을 제어하고, 전술한 미생물 재성장 문제를 최소화시키기 위해서이다.⁶⁾ 더구나 국내의 경우 배급수 계통에서 저수조, 밸브류, 배수지, 가압장 등의 시설물들이 다수 분포하여 수도물의 정체시간이 길어지므로 유리잔류염소의 유지가 어려워 미생물 재성장 가능성이 높음으로 알려져 있다. 특히, 대형 저수조의 경우 구조적 결함에 의해 정체 구역이 형성되고 부식, 도장재 등의 내부오염원도 일부 존재하고 있다. 소형 물탱크도 햇빛 차단장치가 없는 옥외 설치 구조가 47%나 되고, 청소 실시율도 23%에 불과하여 배수지 및 물탱크 등과 같은 저수시설에 대한 체계적인 관리가 요구된다.⁷⁾

이러한 국내의 배급수 계통의 구조적 특성은 수도물의 2차오염을 가져오는 주요한 원인을 제공하여 수도물의 수질을 악화시키는 결과를 가져오고 있다.⁸⁾ 더구나, 배급수 시설물은 전체 상수도시설의 약 70%를 차지하고 있고, 50년 이상 경과된 노후 매설관도 다수 존재하고 있어 배급수 계통의 유지관리가 수도물의 수질에 미치는 영향은 매우 크다.⁹⁾

배급수 계통에서 발견되는 종속영양세균 중 기회성 감염 병원균(opportunistic pathogens)이 다수 존재하는데 이는 수인성 질병의 발생과 관련이 있는 것으로 보고되고 있다.¹⁰⁾ 특히 신생아, 환자, 노약자 등 면역성이 약한 특정 집단을 감염시킬 수 있고, 2차 감염의 원인이 되기도 한다.

국내에서도 원수의 수질오염과 정수장의 처리공정에 대한 연구는 상당히 진행되었으나, 배급수 계통에서 배수지 등의 시설물이 수도물의 수질에 미치는 영향에 대한 연구는 아직까지 본격적으로 이루어지고 있지 못한 실정이다. 더구나 국내 정수장으로부터 배급수 계통에의 각 시설물들까지 체류시간에 따른 염소의 소모율이 파악되지 않아 적정 잔류염소농도의 유지 관리가 어렵다.

본 연구는 구조적 특성이 서로 다른 K 및 Y 배급수 계통을 대상으로 수질변화가 예상되는 시설물들을 중심으로 유리잔류염소농도에 따른 종속영양세균의 거동을 평가하여 수도물 배급수 계통에서 수질을 안정적으로 유지할 수 있는 방안을 검토하였다. 또한 배급수 계통에서 종속영양세균의 분리동정을 통해 수도물에서 우

집하는 세균을 파악하고 배급수 계통 구성 요소에 따른 미생물의 분포를 분석하고자 하였다.

II. 연구방법

1. 대상 배급수 계통

1) 구조적 특성

K 정수장의 배급수 계통은 정수→배수지→수돗물(이하 직수로 표기) 혹은 정수→배수지→물탱크→수돗물, Y 정수장의 배급수 계통은 정수→배수지→소배수지→직수 혹은 정수→배수지→소배수지→물탱크→수돗물로 구성되어 있다.

K 및 Y 배급수 계통의 특성을 Table 1에 요약하였다. K 및 Y 배급수 계통의 배수지 시설용량은 각각 10,000, 50,000 ton 규모로 Y 배급수 계통의 총 배수용량은 K 배급수 계통의 약 5배이다. Y 배급수 계통의 배수지 및 소배수지의 체류시간은 각각 496, 743분이고, K 배급수계통의 배수지에서 체류시간은 166분이다. 즉, Y 배수지의 체류시간은 K 배수지의 약 3배, 소배수지의 체류시간까지 포함하면 약 7.5배이다.

K 및 Y 배급수 계통에 있어서 총 관의 길이는 각각 14.2, 14.5 km이고, 총 급수관의 길이는 각각 3.7, 7.0 km이다. 두 배급수 계통은 총 관의 길이가 거의 비슷하지만 총 급수관의 길이는 Y 배급수 계통이 K 계통의 약 2배이었다.

2. 시료채취

본 연구에서는 서로 다른 구조적 특성을 가지고 있는 K 및 Y 배급수 계통에서 Table 1에서 제시된 배수지, 지하 저수조, 물탱크 및 수도꼭지 등의 지점에서 시료를 채수하였다. 시료 채수병은 3%의 티오황산나트륨($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) 용액을 주입하여 잔류염소를 중화시킨 후 고압증기로 멸균하였다. 외부에 의한 오염을 방지하기 위하여 여과장치, 고무호스 등을 제거한 후 수도꼭지부분을 화염·멸균시켰으며 수도물은 약 2~3분간 관내에 정체되어 있는 퇴적물을 배수시킨 후 시료를 채수하였다.

3. 분석방법

유리잔류염소, pH, 수온 및 탁도는 현장에서 측정하였고, TOC, $\text{NH}_3\text{-N}$, SO_4^{2-} 등의 수질 항목은 실험실로 운반하여 분석하였다. 본 실험에 사용한 분석 방법은 Table 2와 같으며 실험 기간 중 수질을 Table 3에 제시하였다.

종속영양세균은 R_2A 배지에서 도말 평판법으로 각각

Table 1. Sampling sites in distribution systems

Site		Distance from waterworks (Km)	Retention time (min)	Characteristics
K distribution system	Finished water	-	-	K waterworks (Intake : Pal dang)
	Reservoir	10.5	166	10,000 ton
	Tap water without storage tank	14.0	203	
	Storage tank	14.1	413	1,100 ton
	Tap water with storage tank	14.2	510	
Y distribution system	Finished water	-	-	Y waterworks (Intake : Pung nap)
	Reservoir	7.5	496	50,000 ton
	Small Reservoir	14.2	743	500 ton
	Tap water without storage tank	14.4	748	
	Storage tank	14.5	839	2 ton
	Tap water with storage tank	14.5	840	

Table 2. Analytical methods to physicochemical parameters

Parameters	Analytical methods	Apparatus
pH	Electrometric	pH meter(HORIBA, F-16)
Turbidity	Nephelometric	Turbidimeter(HACH, 2100A)
Free Chlorine	DPD Colorimetric	DPD Colorimeter(HACH)
DO	Azide Modification	Titration
NH ₃ -N, Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻	Ion Chromatography	IC(DIONEX, DX-300)
Fe, Cu, Mn, Zn	ICP	ICP(AES, JY38Plus)
TOC	Combustion Infrared	TOC Analyzer(SHIMADZU, TOC-5000)

Table 3. Water quality in distribution systems

Item	January		March		August	
	K	Y	K	Y	K	Y
Temperature(°C)	2.9	2.7	8.6	9.2	26.4	25.9
pH(units)	7.20	7.09	7.33	7.33	7.13	7.18
Turbidity(NTU)	0.16	0.14	0.28	0.19	0.23	0.26
DO(mg/l)	14.49	14.60	11.81	12.01	8.35	8.42
Cl ⁻ (mg/l)	9.2	13.7	20.0	25.2	10.5	11.4
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	12	17	19	24	11	14
NH ₃ -N(mg/l)	0.02	0.05	ND	ND	0.03	0.03
TOC(mg/l)	1.53	1.59	2.35	2.82	1.62	1.56
Fe(mg/l)	0.02	0.01	0.04	0.02	0.05	0.03
Mn(mg/l)	0.001	0.005	0.000	0.003	0.006	0.006
Zn(mg/l)	0.026	0.012	0.062	0.026	0.063	0.034
Cu(mg/l)	ND	0.002	0.001	0.004	0.005	0.007

*ND : Not detected.

접종하였다. 직경 147 mm의 페트리디쉬에 멸균된 배지를 적당량 분주하고 하루동안 배지를 건조시켰다. 배지에 시료를 1 ml 접종한 후 유리막대로 충분히 흡착하

도록 도말하였다. 접종된 시료는 21±1°C에서 72±3 hr 배양하여 형성된 집락수를 계수하였다. 집락이 형성된 미생물을 동정하기 위해 먼저 화염 별

Table 4. Conditions of Gas chromatography for microbial identification

Item	Condition
Detector	FID
Initial temp.(°C)	170
Final temp.(°C)	310
Detector temp.(°C)	300
Injection port temp.(°C)	250
Progress rate.(°C/min)	5 (170~260°C) 40 (260~310°C)
Column flow rate(ml/min)	0.3
Split ratio.	100
Hydrogen gas(ml/min)	30
Air gas(ml/min)	400
Nitrogen gas(ml/min)	30

균한 백금으로 R₂A배지 위에 형성된 단일 집락을 획선 접종(quadrant streak)하였으며 21±1°C에서 72±3시간 배양하였다. 단일 집락이 형성된 세균에 대해 백금으로 각각 Tryptic soy 및 R₃A broth에 접종하여 28°C에서 24시간동안 계대 배양시켰다. 계대 배양하여 순수 분리된 미생물은 TSBA(Tryptic Soy Broth Agar)배지에서 획선 접종한 후 28±1°C에서 24±2시간 동안 배양시켰다. 대수성장단계의 말기에 해당되는 3번째 획선 접종 세균을 이용하여 미생물의 지방산을 추출하였다. 추출된 지방산을 2 μl 취하여 분류 동정장치(Microbial Identification System, MIDI)가 부착된 GC/FID(HP 6890 Series, Hewlett Packard)로 분석하고 그 결과를 표준 라이브러리와 비교하여 동정하였다. Gas chromatography의 운전 조건은 Table 4와 같다.

분류동정장치로 동정된 종속영양세균은 그람 염색을 실시한 후 1,000배를 광학 현미경으로 미생물의 형태와 그람 양성, 음성 여부를 관찰하였다. 관찰된 세균의 모양과 구조는 화상 분석기(Image analyzer)로 분석하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 유리잔류염소의 분포 특성

본 실험에서 서로 다른 구조적 특성을 가진 두 배급수 계통에서 유리 잔류염소의 소모특성을 고찰해 보았다. K 및 Y 배급수 계통의 배수지, 지하 저수조, 옥상 물탱크 등에서 계절별 유리 잔류염소의 농도 변화는 Fig. 1, Fig. 2와 같다.

각각의 대상 시설물에서 유리 잔류염소의 소모율은 다음과 같다. K 배급수 계통에서 배수지, 물탱크, 물탱

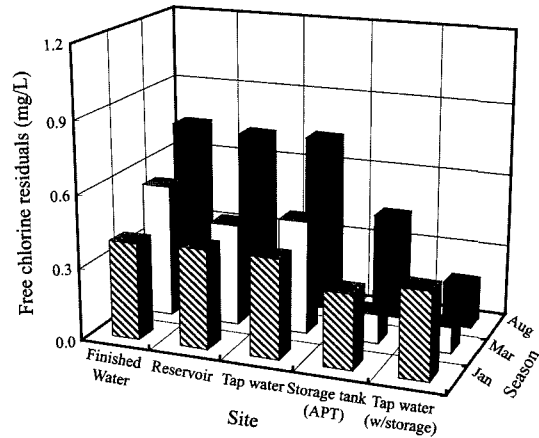


Fig. 1. Free chlorine residuals in K distribution systems.

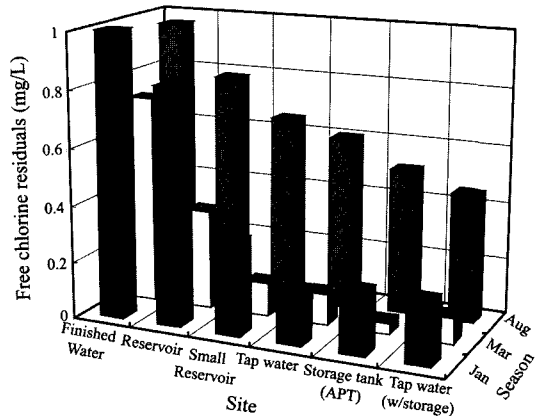


Fig. 2. Free chlorine residuals in Y distribution systems.

크를 경유한 수도물에서 각 시설별 유리 잔류염소의 평균 소모율은 0.05, 0.23, 0.07 mg/l이었고, 배수지에서 직수로 가는 과정에서 유리 잔류염소는 소모되지 않았다. 따라서 K 배급수 계통에서 정수→배수지→수도물, 정수→배수지→물탱크→수도물의 과정을 거치면 총 0.28, 0.35 mg/l의 유리염소가 소모되었다.

Y 배급수 계통의 배수지, 소배수지, 직수, 물탱크에서 유리 잔류염소의 평균 소모율은 각각 0.24, 0.29, 0.07, 0.11 mg/l이었고, 물탱크에서 수도물로 가는 과정에서의 염소 손실은 없었다. Y 배급수 계통에서 유리 잔류염소는 정수→배수지→소배수지→수도물 및 정수→배수지→소배수지→물탱크→수도물의 과정을 거치면서 각각 0.6, 0.64 mg/l 소모되었다.

이상의 결과로부터 배급수 계통이 정수→배수지→수도물, 정수→배수지→물탱크→수도물, 정

수→배수지→소배수지→수돗물, 정수→배수지→소배수지→물탱크→수돗물의 구조일 때 유리 잔류염소는 각각 0.28, 0.35, 0.6, 0.64 mg/l가 소모되었다. 즉, 배급수계통에서 앞서 제시한 각종 시설물들은 체류시간의 연장을 가져와 유리염소의 소모율을 증가시켰다. 따라서, 소독제 농도를 일정 농도이상 관말까지 유지시키고자 할 때 배급수 계통의 해당 구성시설물에 따라 연장되는 체류시간을 고려하여 정수장에서 소독제의 농도를 산정하여 투입해야 할 것으로 판단된다.

유리 잔류염소의 농도는 관말 지역에 가까워질수록 점차 감소되어 배수지 이후의 저수시설에서는 유리 잔류염소의 농도가 0.20 mg/l 이하로 측정되는 경우가 다수 있었다.

두 배급수 계통은 유리 잔류염소의 농도 변화가 서로 다른 양상을 보였다. K 배급수 계통은 배수지에서 유리잔류염소의 소모율은 Y 배급수 계통보다 낮았으며 특히 관말 지역의 소모율이 비교적 높아 전체의 70.4~96.4%가 소모되었다. 반면 Y 배급수 계통은 배수지 및 소배수지에서 전체의 60.7~95.3%가 소모되었으나 관말 지역의 소모율은 상대적으로 낮았다.

Y 배급수 계통에서 배수지와 소배수지에서 소모율이 높았던 이유는 Y 배급수 계통의 총 체류시간은 496분으로, 염소의 자연 소모와 유기물 및 환원성 물질과의 반응시간이 충분하였기 때문으로 판단된다. 더구나 Y 배급수 계통은 배수지 이후 소배수지에서의 체류시간이 743분이므로 염소 소모율이 더욱 증가하였다. 반면 K 배급수 계통의 경우 배수지 체류시간이 166분으로

비교적 짧아 유리 잔류염소의 소모율이 비교적 적었던 것으로 판단된다.

K, Y 배급수계통에서의 각 시설물에 따른 주요수질 인자의 변화를 Table 3, 4에 제시하였다. 유리잔류염소의 소모반응에 영향을 주는 탁도, 총유기탄소, 철 등의 항목이 Y 배급수계통에서 K 배급수계통에 비해 더 높은 것으로 나타났다. 특히 총 유기탄소의 농도는 정수에서는 두 배급수계통이 유사한 농도로 검출되었으나 관말지역으로 갈수록 Y 배급수계통의 검출농도가 증가되는 경향을 나타내었다.

두 배급수 계통에서 유리 잔류염소의 계절에 따른 변화는 다음과 같다. 1월 중 K 배급수 계통에서 유리 잔류염소의 농도는 정수와 관말지역의 수돗물에서 각각 0.40, 0.30 mg/l이었다. 반면, Y 배급수 계통의 경우 정수와 관말지역의 수돗물에서 각각 0.96, 0.45 mg/l이었다. 즉, 정수처리 후 배급수 계통을 통과하는 동안 유리 잔류염소는 총 0.10, 0.51 mg/l 소모되어 Y 배급수 계통에서의 소모율이 높았다.

3월에는 K, Y 배급수 계통에서 유리 잔류염소의 총 소모율이 각각 0.44, 0.64 mg/l이었다. 8월에는 K, Y 배급수 계통에서 유리잔류염소의 총 소모율이 각각 0.56, 0.78 mg/l이었다. 따라서 온도가 증가함에 따라 배급수 계통에서 유리 잔류염소의 소모율은 점차 증가하였다.

이 등(1997)은 배급수 관망에서 유리 잔류 염소의 농도가 계절 변화에 따른 일관성을 보이지 않는다고 보고하였다.¹¹⁾ 본 연구에서 선정된 K 및 Y 배급수 계통

Table 5. Water quality in K distribution system

Season	Item	Finished water	Reservoir	Tap water	Storage tank	Tap water (w/storage)
Jan.	Turbidity(NTU)	0.10	0.15	0.27	0.13	0.15
	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	11.6	11.6	11.9	12.2	10.8
	NH ₃ -N(mg/l)	0.020	0.023	0.020	0.020	0.021
	TOC(mg/l)	1.41	2.15	1.49	1.21	1.37
	Fe(mg/l)	0.003	0.042	0.015	0.015	0.013
Mar.	Turbidity(NTU)	0.14	0.30	0.19	0.54	0.21
	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	19.6	19.5	19.7	18.6	18.5
	NH ₃ -N(mg/l)	ND	ND	ND	ND	ND
	TOC(mg/l)	3.07	2.08	2.21	2.19	2.22
	Fe(mg/l)	0.012	0.038	0.008	0.013	0.021
Aug.	Turbidity(NTU)	0.15	0.25	0.19	0.35	0.21
	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	10.9	11.0	11.0	13.4	13.4
	NH ₃ -N(mg/l)	0.034	0.037	0.028	0.022	0.042
	TOC(mg/l)	1.56	1.60	1.35	1.57	1.39
	Fe(mg/l)	0.017	0.111	0.012	0.086	0.016

Table 6. Water quality in Y distribution system

Season	Item	Finished water	Reservoir	Small reservoir	Tap water	Storage tank	Tap water (w/storage)
Jan.	Turbidity(NTU)	0.11	0.11	0.11	0.20	0.19	0.14
	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	16.4	17.3	15.1	18.1	16.0	16.4
	NH ₃ -N(mg/l)	0.024	0.023	0.022	0.023	0.021	0.021
	TOC(mg/l)	1.43	2.10	1.25	1.53	1.60	1.61
	Fe(mg/l)	0.007	0.002	0.008	0.021	0.020	0.020
Mar.	Turbidity(NTU)	0.17	0.16	0.19	0.21	0.22	0.20
	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	23.6	23.7	24.7	24.6	25.0	24.9
	NH ₃ -N(mg/l)	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	TOC(mg/l)	3.30	2.81	2.74	2.70	2.77	2.57
	Fe(mg/l)	0.008	0.004	0.018	0.017	0.029	0.028
Aug.	Turbidity(NTU)	0.19	0.24	0.18	0.36	0.22	0.34
	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	14.1	13.8	14.0	14.0	14.4	14.2
	NH ₃ -N(mg/l)	0.023	0.033	0.032	0.066	0.025	0.027
	TOC(mg/l)	1.47	1.60	1.58	1.56	1.66	1.51
	Fe(mg/l)	0.014	0.006	0.051	0.077	0.018	0.020

은 계절에 따른 유리 잔류염소의 농도변화가 뚜렷하였다. 배급수 계통에 있어서 유리 잔류염소의 소모는 수 많은 인자들의 영향을 받지만 대상 배급수 계통의 pH가 비교적 일정하였고 염소의 화학적 특성상 온도 조건에 민감하므로 계절에 따라 뚜렷한 변화를 보인 것으로 판단된다. 또한 모든 계절에서 Y 배급수 계통의 유리 잔류염소소모율이 K 배급수 계통에 비해 컸다.

더욱이, 염소의 소모율이 큰 배수지에서부터 관말지역까지 급수관의 길이가 K 배급수 계통은 3.7 km, Y 배급수 계통은 7.0 km로 Y 배급수계통에서의 길이가 K 배급수계통의 길이의 약 2배에 해당되므로 Y 배급수 계통에 있어서 유리잔류염소의 감소비율이 높았던

것으로 판단된다.

2. 종속영양세균의 분포 특성

K 및 Y 배급수 계통의 대상지점에 대한 계절별 종속영양세균의 농도는 Fig. 3, Fig. 4와 같다. 계절에 따른 종속영양세균의 농도 변화는 다음과 같다. 1월의 경우, K 배급수 계통은 0~4 CFU/ml, Y 배급수 계통은 0~270 CFU/ml이었다. 3월의 경우, K 배급수 계통은 1~43 CFU/ml, Y 배급수 계통은 1~86 CFU/ml이었다. 8월 중 K 배급수 계통은 0~40 CFU/ml, Y 배급수 계통은 0~12 CFU/ml이었다.

따라서, 모든 계절에서 Y 배급수 계통에서 검출된 종속영양세균 농도가 K 배급수 계통보다 높았고, 두 배

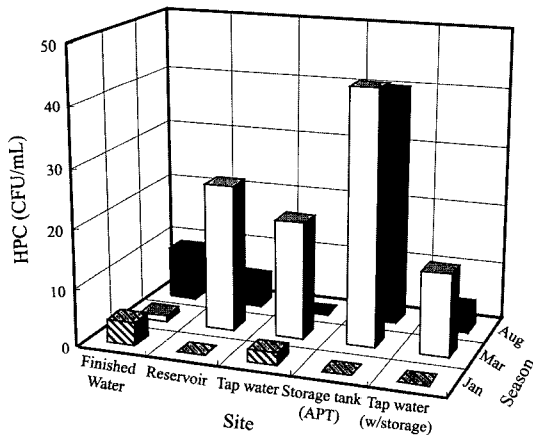


Fig. 3. HPC in K distribution systems.

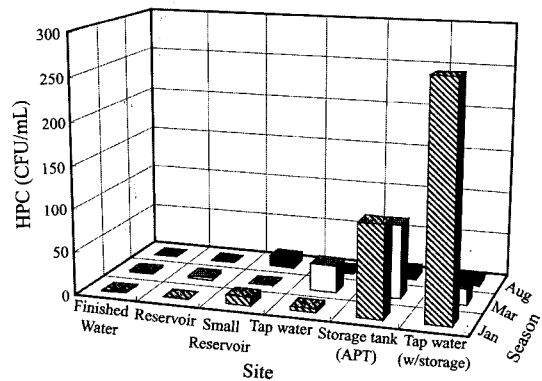


Fig. 4. HPC in Y distribution systems.

급수 계통의 경우 종속영양세균의 분포는 잔류염소의 농도변화와 달리 온도조건에 민감하지 않았다. K 및 Y 배급수 계통에서 종속 영양세균이 최대값을 나타낸 달은 각각 3, 1월이었다.

각각의 대상 시설물에서 종속 영양세균의 평균 농도는 다음과 같다. K 배급수 계통의 경우, 정수, 배수지, 직수, 물탱크, 물탱크를 경유한 수돗물의 종속영양세균은 각각 5, 10, 7, 28, 6 CFU/ml이었고 정수, 배수지, 소비수지, 직수, 물탱크, 물탱크를 경유한 수돗물의 종속 영양세균은 각각 1, 1, 8, 13, 68, 98 CFU/ml이었다. 이처럼 관말 지역으로 갈수록 종속영양세균의 농도가 높은 것은 배급수 계통의 구조물을 통과하는 과정에서 유리 잔류염소의 감소에 의해 미생물이 재생장한 결과로 판단된다.

특히, Y 배급수 계통은 관말지역으로 갈수록 종속 영양세균농도의 증가가 뚜렷하였다. 정수에서 1 CFU/ml인 종속 영양세균은 옥상의 물탱크와 물탱크를 경유한 수돗물에서 각각 107, 270 CFU/ml이었다. 3월과 8월의 경우도 관말지역으로 갈수록 종속영양세균의 농도는 증가하였다.

Y 배급수 계통은 배수지에서 유리잔류염소의 소모율이 높았고, 관말지역으로 갈수록 유리잔류염소의 농도

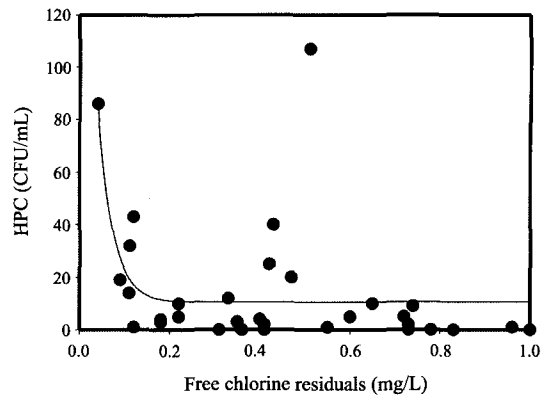


Fig. 5. Relationship between free chlorine residuals and HPC.

가 감소했고 종속영양세균의 증가가 K 배급수 계통에 비해 더욱 뚜렷하였다. Y 배급수 계통에 있어서 1월과 8월의 경우, 잔류염소를 0.2 mg/l 이상으로 유지시켰음에도 불구하고 관말에서 종속영양세균의 농도가 증가하였다.

3. 유리잔류염소와 종속영양세균의 관계

K, Y 배급수 계통에서 유리 잔류염소와 종속 영양세

Table 7. Identified heterotrophic bacteria in sites

Sites	Jan.	Mar.	Aug.	
K distribution systems	Finished water	<i>Micrococcus</i> (2) <i>Pseudomonas</i> (1)	-	<i>Cellulomonas</i> (1) <i>Deinococcus</i> (1)
	Reservoir	-	<i>Spingomonas</i> (4) <i>Bacillus</i> (1)	-
	Tap water	-	<i>Micrococcus</i> (1) <i>Acidovorax</i> (1)	-
	Storage tank(APT)	<i>Pseudomonas</i> (1) <i>Acidovorax</i> (1)	<i>Spingomonas</i> (5) <i>Bacillus</i> (1) <i>Hydrogenophaga</i> (1)	<i>Spingomonas</i> (1) <i>Arthrobacter</i> (1) <i>Aureobacterium</i> (1)
	Tap water (w/storage)	<i>Pseudomonas</i> (1)	<i>Staphylococcus</i> (1) <i>Spingomonas</i> (1)	<i>Micrococcus</i> (2)
Y distribution systems	Finished water	-	-	-
	Reservoir	-	-	-
	Small Reservoir	<i>Staphylococcus</i> (1) <i>Acinetobacter</i> (1)	-	<i>Agrobacterium</i> (2) <i>Curtobacterium</i> (1)
	Tap water	-	<i>Cellulomonas</i> (1)	-
	Storage tank	<i>Acinetobacter</i> (2) <i>Pseudomonas</i> (1)	<i>Bacillus</i> (3)	<i>Variovorax</i> (1)
Tap water (w/storage)	<i>Micrococcus</i> (3) <i>Bacillus</i> (2) <i>Corynebacterium</i> (2) <i>Arthrobacter</i> (1)	<i>Micrococcus</i> (2) <i>Bacillus</i> (1) <i>Methylobacterium</i> (1) <i>Gordona</i> (1) <i>Bradyrhizobium</i> (1)	-	

균의 관계는 Fig. 5와 같다. Reilly는 유리 잔류염소의 농도가 증가함에 따라 종속 영양세균수가 명확하게 감소하였다고 보고하였다.¹²⁾ 본 실험에서도 유리 잔류염소와 종속 영양세균은 이와 같은 경향을 나타냈는데 배급수 계통에서 유리 잔류염소를 유지시키는 것이 미생물의 재성장을 제어하기 위한 비교적 유용한 수단임을 나타낸다.

유리잔류염소의 농도와 종속 영양세균과의 관계는 $HPC(CFU/ml) = 253 \exp(-30.4 \cdot \text{free chlorine residuals}) + 10.5$ 였다. 일부지역에서 유리잔류염소농도가 상당히 유지되는 지역에서도 종속영양세균의 수가 증가하는 현상이 나타났는데 이는 배급수 계통에서 유리 잔류염소 외에 수질, 유체의 흐름, 관 내부 생물막의 형성 등 다른 인자들의 영향이 있는 것으로 추정된다.

4. 종속영양세균 분리동정

배급수 계통에서 각 대상 지점에서 계절변화에 따라 검출된 종속영양세균의 종류는 Table 7와 같다. 세포내의 지방산을 추출한 후 미생물 분류동정장치로 종속영양세균을 동정한 결과 *Sphingomonas*, *Micrococcus*, *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Acinetobacter*, *Staphylococcus*, *Acidovorax*, *Gordona*, *Corynebacterium*, *Arthrobacter*, *Cellulomonas*, *Agrobacterium*, *Deinococcus*, *Methylobacterium*, *Hydrogenophaga*, *Bradyrhizobium*, *Aureo-*

bacterium, *Curtobacterium*, *Variovorax*이 검출되었다. 박¹³⁾은 한강원수 중에서 *Pseudomonas*, *Acinetobacter*, *Moraxella*, *Micrococcus*, *Streptococcus*, *Alkaligenes*, *Kingella*, *Bordetella* 등의 종속영양세균을 검출한 바 있다. 본 배급수 계통에서 동정된 *Sphingomonas*, *Acinetobacter* 등의 세균은 소독제에 대해 비교적 저항성이 큰 것으로 알려져 있다.¹⁴⁾

K 및 Y 배급수 계통에서 동정된 종속영양세균은 각각 11, 14속으로 Y 계통의 세균종류가 K에 비해 다양하였다. K 배급수 계통의 경우 1월에 정수에서 *Micrococcus*, *Pseudomonas*가 출현하였고, 배수지 및 직수에 없었던 *Pseudomonas*, *Acidovorax*가 지하 저수조 및 지하저수조를 경유한 수돗물에서 검출되었다. 특히 *Pseudomonas*는 정수, 지하저수조 및 지하저수조를 경유한 수돗물에서 모두 검출되었다. 3월에는 정수에서 전혀 검출되지 않았던 종속영양세균이 배수지, 직수, 지하저수조 및 그 수돗물에서 *Sphingomonas*, *Acidovorax*, *Hydrogenophaga*, *Staphylococcus* 등이 발견되었다. 특히 *Sphingomonas*는 직수를 제외한 모든 대상지점에서 검출되었다. 8월에는 정수에서 *Cellulomonas*, *Deinococcus*, 지하저수조에서 *Arthrobacter*, *Sphingomonas*, *Aureobacterium*이 검출되었다.

Y 배급수 계통의 정수 및 배수지에서는 종속영양세균이 전혀 검출되지 않았으나, 소비수지 이후에서 다양

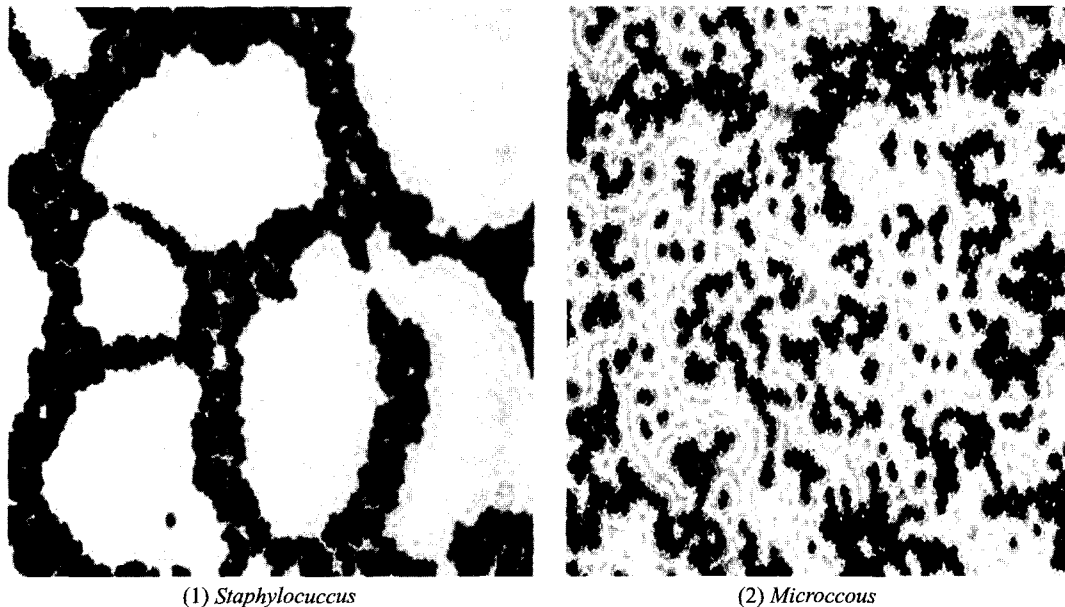


Fig. 6. Photograph of identified coccus.

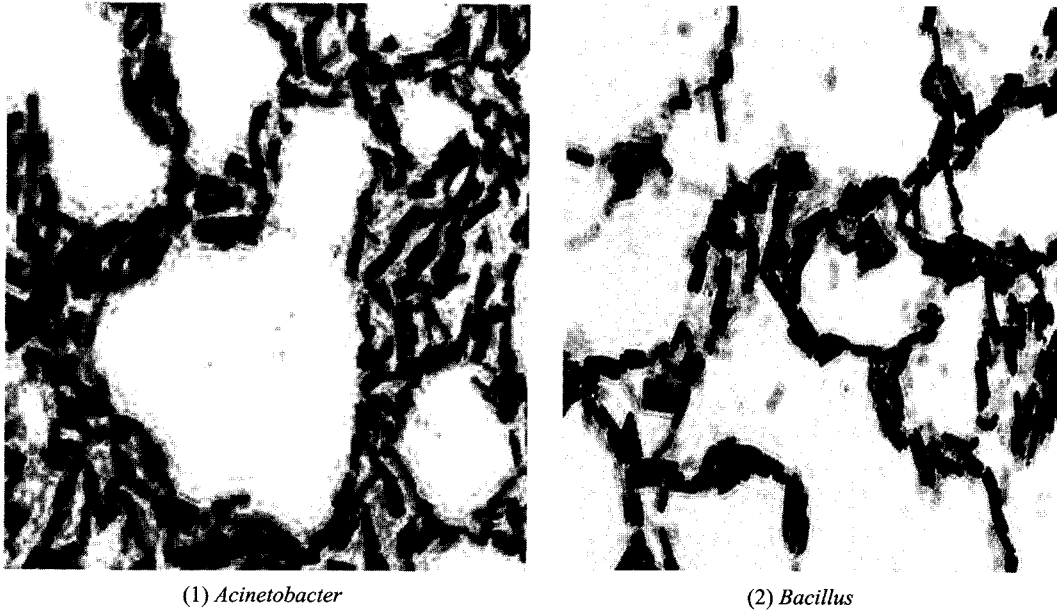


Fig. 7. Photograph of identified bacteria containing capsule.

한 종류가 검출되었다. 1월의 경우 소배수지에서 *Staphylococcus*, *Acinetobacter*가 발견되었으나, 직수에서는 검출되지 않았다. 물탱크에서는 *Acinetobacter*, *Pseudomonas*, 수돗물에서는 *Micrococcus*, *Bacillus*, *Corynebacterium*, *Arthrobacter*가 동정되었다. 특히 *Acinetobacter*는 소배수지, 물탱크, 수돗물에서 모두 검출되었다. 3월의 경우 정수, 배수지, 소배수지에서 검출되지 않던 종속영양세균이 직수 및 물탱크를 경유한 수돗물에서 *Micrococcus*, *Bacillus*, *Gordona*, *Methylobacterium*, *Bradyrhizobium*이 검출되었다. 8월에는 소배수지에서 *Agrobacterium*, *Curtobacterium*, 물탱크에서 *Variovorax*만이 검출되어 동정된 종속영양세균의 종류가 1, 3월에 비해 적었다.

두 배급수 계통에서 공통적으로 *Micrococcus*, *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Micrococcus*, *Staphylococcus*, *Arthrobacter*, *Cellulomonas*가 존재하고 있음을 확인하였다.

5. 종속영양세균의 현미경 관찰

그람 염색을 실시한 후 광학현미경으로 관찰된 종속영양세균의 형태는 Fig. 6, Fig. 7과 같다. 종속영양세균들은 배급수 계통에서 성장하기에 적합한 구조적 특징이 발견되었으며 그람 염색을 실시한 결과, 소독제에 대해 비교적 내성이 강한 그람양성 세균이 약 50%를

차지하였다. 특히 정수와 배수지에서 검출되는 세균들은 대부분 간균 형태이지만, 관말 지역으로 갈수록 소독제에 대해 내성이 강한 *Staphylococcus*, *Micrococcus* 등의 구균의 비율이 높았다.

간균인 *Acinetobacter*는 그람 음성이었으며 캡슐을 가지고 있는 구조가 관찰되었는데 이러한 캡슐 구조가 소독제에 대해 보호막의 역할을 하는 것으로 판단된다. *Bacillus*는 그람 양성이고 캡슐 구조를 가지고 있었다. 한편, *Staphylococcus*는 그람 양성, *Sphingomonas* 및 *Flavobacterium*은 그람 음성이었다.

수돗물 배급수 계통에서 검출되는 종속영양세균은 대부분 캡슐 구조를 이루고 있거나, 캡슐을 형성하지 않는 종들은 대부분 그람 양성으로 특유의 펩티도 글리칸층을 가지고 있어 소독제에 대해 강한 내성을 가지는 것으로 판단된다.

IV. 결 론

본 연구는 서로 다른 구조적 특성을 가진 K 및 Y 배급수 계통을 선정하여 수질변화가 비교적 큰 지점을 중심으로 유리 잔류염소농도의 변화에 따른 종속영양세균의 거동을 고찰하였다. 본 연구 결과로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 배급수 계통에서 유리잔류염소는 온도가 높아짐에

따라 소모율이 증가하여 계절별로 뚜렷한 변화를 보였다. 유리잔류염소의 농도는 관말 지역에 가까워질수록 점차 감소하였고 배수지 이후 저수시설에서는 0.2 mg/l 이하인 경우가 다수 있었다.

2. 정수지와 관말 사이에 있어서 유리잔류염소의 평균 소모율은 K 및 Y 배급수 계통에서 각각 0.35, 0.64 mg/l이었다. 후자가 보다 많이 소모된 것은 배수지의 체류시간과 급수거리가 긴 여건에서 그 원인을 찾을 수 있다.

3. 종속영양세균은 온도 조건에 민감하지 않았으나 유리잔류염소가 소모되는 관말지역으로 갈수록 점차 증가하였으며 검출된 종류도 다양하였다. 이를 근거로 두 배급수 계통에서 미생물의 재생장 여부를 확인하였다.

4. 종속영양세균은 K 및 Y 배급수 계통에서 각각 0~40, 0~270 CFU/ml로 Y 배급수 계통이 더 높았다. 동정한 종속영양세균의 종류도 Y 배급수 계통에서 더 많았다. 종속영양세균의 우점종은 *Acinetobacter*, *Sphingomonas*, *Micrococcus*, *Bacillus*, *Staphylococcus* 등이었다. 이들은 소독제에 대해 보호막의 역할을 하는 캡슐구조이거나 그람양성이었다. 정수지와 배수지에서 검출되는 세균들은 대부분 간균 형태이지만 관말지역으로 갈수록 구균의 비율이 높았다.

참고문헌

1. LeChevallier, M. W., Cameron, S. C. and McFeters, G. A.: New medium for improved recovery of coliform bacteria from drinking water. *Appl. Environ., Microbiol.*, **45**(2), 484-492, 1982.
2. Geldreich, E. E., Fox, K. R., Goodrich, J. A., Rice, E. W., Clark, R. M. and Swerdlow, D. L.: Searching for a water supply connection in the cabool. Missouri, Decease Outbreak of *Escherichia coli* 0157 H7, *Wat. Res.*, **26**(8), 1127-1137, 1992.
3. 조영희 : 수도물에서 BDOC가 세균의 소독과 재증식에 미치는 영향. 건국대학교 석사학위논문, 3-15, 1996.
4. LeChevallier, M. W., Babcock, T. S. and Lee, R. G.: Examination and characterization of distribution system biofilms. *Appl. Environ. Microbiol.*, **53**(12), 2714-2724, 1987.
5. Charaklis, W. G. and Marshall, K. C.: Biofilms, John Wiley & Sons Inc., New York, 20-36, 1990.
6. 조용모, 홍헌표, 이연희 : 수도물 직결공급체계 도입에 관한 연구. 서울시정개발연구원, 125-132, 1996.
7. 서울시 : 저수조 실태조사 및 개선방안 연구. 수도기술연구소, 92-112, 1999.
8. 한국수도협회 : 저수조(물탱크)의 위생관리. 12-13, 1995.
9. 조용모, 조항문, 이연희 : 효율적인 배수계통 구축에 관한 연구. 서울시정개발연구원, 25-35, 1998.
10. Payment, P., Gamache, F. and Paquette, G.: Comparison of microbiological data from two water filtration plants and their distribution system. *Water Sci. Technol.*, **21**(3), 287-289, 1989.
11. 이현동, 정원식, 문숙미 : 상수도 배관망에서의 수질변화에 관한 연구. 대한 상하수도학회지, **11**(3), 59-65, 1997.
12. Reilly, J. K. and Kippin, J. S.: Relationship of bacterial counts with turbidity and free chlorine in two distribution systems. *J. AWWA*, **75**(2), 309-312, 1983.
13. 박성주 : 상수도 급수계통에서의 세균 재생장 및 생물막 형성에 관한 연구. 서울대학교 박사학위논문, 98-104, 1993.
14. LeChevallier, M. W., Cawthon, C. D. and Lee, R. G.: Factors promoting survival of bacteria in contaminated water supplies. *Appl. Environ., Microbiol.*, **54**(3), 649-654, 1988.
15. Stewart, M. H. and Olson, B. H.: Mechanisms of bacterial resistance to inorganic chloramines. Proceeding of the AWWA Water Quality Technology Conference, Portland, Denver, 1986.