



배·급수관망에서 생물막 제어

문성민·윤제용[†]

서울대학교 화학생물공학부

Control of Biofilms in the Drinking Water Distribution System

Sungmin, Mun · Jeyong Yoon[†]

School of Chemical and Biological Engineering, Seoul National University

(Received 18 October 2006, Accepted 22 December 2006)

Abstract

The low nutrient environment in drinking water treatment plants and distribution systems cannot to be a good environment for bacterial growth. However, biofilms can be frequently found submerged surface in treatment plants and distribution system. Biofilms in distribution system are harmful, in that they can release organisms, and may cause problems in taste and odor of water. Control of these biofilms is difficult, and disinfection alone is usually ineffective. Biofilms will not be eliminated from distribution systems by any contemporary technology available now or in the future. Therefore reduction of organic matter, improved disinfection, or a combination of these methods can be useful in controlling distribution system biofilms.

keywords : Biofilms, Control, Drinking water distribution system

1. 서론

국내 수도물 정책 및 연구는 급수 기능의 지속성 및 수질의 안정성 확보에 대한 사회적 요구 수준을 만족시키기 위하여, 상수원수의 수질향상 및 정수처리 기술개발에 역점을 두어 왔다. 그러나 양질의 수도물이 생산 공급되더라도 배·급수관망에서 부식 및 생물막 등에 의한 2차 오염이 존재할 경우 수도물의 안정성은 크게 떨어지기 때문에 최근에는 배·급수관망의 체계적인 관리에 관심이 증가하고 있다. 특히 배·급수관망에서 미생물 재성장 및 생물막 형성은 각 가정에서 사용하는 최종 수도물 수질에 직접적인 영향을 미칠 수 있기 때문에 더욱 중요한 관리 인자 중 하나이다(LeChevallier et al., 1990).

본 글에서는 배·급수관망에서 수행된 연구 문헌을 토대로 생물막 형성에 미치는 주요 인자를 살펴보고 생물막 제어를 위해 일반적인 방법론과 최근에 보고되는 혁신적인 생물막 제어 연구들을 소개하고 앞으로 국내 배·급수관망 생물막 관리를 위해 나아가야할 연구 방향을 제시하고자 하였다.

1.1. 생물막 정의

미생물이 표면위에 부착하여 미생물이 분비하는 체외 분비 물질(extracellular polymeric substance: EPS)에 둘러싸여 형성된 얇은 층을 생물막이라고 정의한다(Hamilton, 1985).

그러나 생물막은 단순한 막이 아니라 생물막 내의 미생물 상호간에 신호물질 전달을 통해 의사소통을 하고 있으며 성장과 탈리의 과정을 수행하는 독립적인 생태계를 이루고 있다(Percival et al., 2000).

생물막을 이루고 있는 구성 요소는 대부분(80-98%)이 물로 이루어져 있으며 나머지 부분은 EPS(건조중량의 80-95%)와 EPS에 흡착된 입자, 침전된 유기물 분자, 미생물로 구성되어 있다(Flemming et al., 2000). 실제로 생물막에서 미생물이 차지하는 부분은 1-2% 정도로 매우 적다. 자연계에서 볼 수 있는 일반적인 생물막의 두께는 수십에서 최대 수백 μm 이며, 환경 조건에 따라 매우 다양하게 나타난다. 생물막은 층을 이루고 있어 표면과 내부의 특성이 달라지는데 50-150 μm 두께에서는 표면의 호기층과 내부의 혐기층으로 나뉘지며 서로 다른 생존환경을 제공한다. 생물막 내부의 미생물은 부유미생물(planktonic microbe) 보다 외부 환경 자원에 대한 저항성이 크게 증가되어 혹독한 환경에서도 생존할 수 있게 된다(Costerton et al., 1994b).

이러한 생물막은 수분이 있는 조건이면 어느 곳에서도 존재할 수 있기 때문에 인간의 활동영역에서 여러 문제를 일으킬 수 있다. 산업시설에서 biofouling을 일으켜 경제적 손실을 야기하고, 배·급수관망에서 생물막 형성은 수도물 수질의 안전성을 위협하며, 의료계에서 의료장비에 형성되는 생물막은 인체에 치명적인 영향을 끼칠 수 있다. 이처럼 생물막 문제는 많은 분야에 영향을 끼치고 있으며 문제 해결을 위한 노력이 매우 필요한 시점이며 본 글에서는 배·급수관망에서 생물막 문제를 다루었다.

[†] To whom correspondence should be addressed.
jeyong@snu.ac.kr

1.2. 배·급수관망에서 생물막

일반적으로 배·급수관망의 수질은 빈영양상태 및 잔류소독제가 존재하는 조건으로 미생물이 생존하기에 좋지 않은 환경이다. 그럼에도 불구하고 배·급수관내로 유입된 미생물들은 흐르는 물의 흐름에 따라 운반되며 유속이 느려지는 지역에서 관 벽에 붙거나 이미 형성된 생물막 속에서 성장하게 된다. 배·급수관망에서 생물막 연구는 1980년대 미국과 유럽을 중심으로 활발하게 이루어졌으며, 배·급수관망에서 생물막 형성이 관 말단에서 검출되는 coliform 문제와 깊은 관련이 있다는 인식에서 시작되었다. 배·급수관망에서 생물막 형성은 가정의 수도물 수질에 부정적인 영향을 미치기 때문에 국민의 건강과 관련되어 매우 중요한 문제로 떠오르고 있다.

미국에서는 1993-1994년 사이 30 건의 수질관련 질병 사고가 발생하였으며, 영국에서도 1937-1986년 사이에 21 건의 수질관련 질병 사고가 발생하였다(Camper et al., 2000; Kooij et al., 1999). 그러나 수질 사고의 원인에 대해서 명확히 밝혀지지는 않았으며 몇몇 연구를 통해 교차배관에서 역류 발생 및 파손된 수도관으로 미생물 유입의 가능성을 보고하고 있다. 한편 수질관련 사고와 미생물의 재성장과의 직접적인 상관관계에 대해서 아직까지 명확하게 밝혀지지는 않았지만 배·급수관에서 검출된 생물막에서 기회감염 미생물(opportunistic pathogens)인 *Klebsiella* spp. and *Aeromonas* spp. 등이 생물막의 구성성분으로 포함되어 있음이 알려져 있어(Geldreich et al., 1987; Camper et al., 1996) 생물막 형성과 수질관련 질병 사고와 어느 정도 관련성이 있음을 말해주고 있다. 추후 연구에서도 배·급수관망에서 미생물이 생존할 수 있으며 생물막을 형성하고 형성된 생물막 안에서 성장한다는 사실이 보고되었으며(Camper et al., 2000; Besner et al., 2002), 미생물의 재성장 및 생물막 형성은 필연적인 것으로 간주되고 있다(Walker et al., 2000).

배·급수관망에서 생물막 형성은 정수처리공정, 처리수의 수질, 잔류소독제, 관재질, 수리학적 특성 등 매우 다양한 요인들과 상호작용의 결과로 생긴 것으로 생성된 생물막을 완전히 제거하거나 생성되지 않게 하는 것은 현실적으로 불가능한 것으로 여겨지며, 생물막이 형성되는 것을 안전한 수준으로 제어하는 것이 현실적인 수단으로 여겨지고 있다(Camper et al., 2000).

추가적으로 배·급수관망에서 생성된 생물막은 수도물에서 맛냄새 문제를 야기시킬 수 있고(Olson, 1982), 관의 부식을 유발하며(Lee et al., 1980) 병원성 미생물 및 기회감염 미생물의 은신처가 될 수 있어(Havelaar et al., 1990) 문제 해결을 위한 연구가 필요하다.

1.3. 국내 생물막 연구

국내에서는 90년대 초반 서울시 구의정수장의 배·급수관망 연구에서 미생물 재성장 현상에 대해서 보고가 되었으며, 서울시의 노후화된 수도관 교체 공사 현장에서 채취한 관 벽에서 약 10^7 cell/cm²의 생존세균수가 검출되었음

이 보고되었다(박 등, 1993). 이러한 보고에도 불구하고 당시에는 배·급수관망에서 생물막 문제는 큰 관심을 끌지 못하였다. 이후 서울시 배·급수관망 말단에서 다양한 종류의 세균이 검출되며 생물막 존재에 대해서 보고되었으며(Lee et al., 2003, 2005), 이러한 보고를 계기로 배·급수관망에서 미생물 재성장 및 생물막 문제의 해결을 위한 연구의 필요성에 대해서 다시 한 번 인식하는 계기가 되었다.

배·급수관망에서 미생물 재성장 문제를 연구하기 위한 몇몇 기초 연구가 수행되었으며, 수도관 재질(stainless와 galvanized iron)에서 BDOC 농도에 따른 미생물 성장에 관한 연구(이 등, 1997b)와 수도관 시편에서 염소살균에 의한 미생물 성장 제어에 관한 연구 등이 있다(이 등, 1997a). 그러나 이러한 연구들도 단편적인 수질 조건에 따른 미생물 성장을 살펴본 것으로 관망에서 생물막 형성을 제어하는 연구로는 충분하지 않았다. 근래에는 배·급수관망에서 형성되는 생물막과 생물막이 형성되는 수질을 동시에 연구함으로써 수도물의 생물학적 안정성 인자를 도출하여 실제로 활용하고자 하는 연구가 수행되었다(박 등, 2006). 최근에는 배·급수관망에서 잔류염소가 지속적으로 유지되지 않을 경우 생물막 형성이 매우 촉진될 수 있음을 보고하여 배·급수관망에서 생물막 억제를 위해서는 잔류염소의 지속적인 유지가 매우 중요하다고 하였다(문 등, 2006).

2. 생물막 형성에 미치는 주요 인자

2.1. 온도

배·급수관망에서 수온은 생물학적 수질이 관여되는 모든 부분에 영향을 주는 요소로 미생물의 생장률, 소독제의 효율, 잔류소독제의 감소, 부식속도 등에 영향을 미친다(LeChevallier et al., 1990). 미생물의 재성장 및 생물막 형성은 수온이 비교적 높은 여름철에 많이 발생하며 15°C보다 높은 수온이 미생물의 재성장과 큰 관련이 있는 것으로 알려져 있다(Besner et al., 2001; Volk et al., 2000a; LeChevallier et al., 1996). Fig. 1은 미국의 31개 배·급수관망 연구를 통해서 평균 수온과 coliform 발생과의 상관관계를 보여주는 것으로 수온이 12°C 이상일 때 coliform 발생률이 급격히 높아지는 것을 알 수 있다(LeChevallier et al., 1996).

대다수의 연구자들은 영양분이 매우 낮은 조건에서 미생물 성장 조절은 온도가 더 중요한 요인임을 결론내리고 있다. 이는 미생물의 생리기능이 자연환경에서 어떻게 대응하는지에 대해서 말해 주는 것으로 heterotrophic plate count (HPC) 박테리아는 coliform 미생물보다 낮은 영양분 농도에서 자랄 수 있는데 이것으로부터 HPC 박테리아는 실질적으로 온도에 의해서 영향을 받고, 반면에 coliform 박테리아는 온도와 영양분 농도에 영향을 받기 때문이다(Besner et al., 2002).

2.2. 잔류소독제

일반적으로 관망에서 일정농도의 잔류 소독제를 유지하

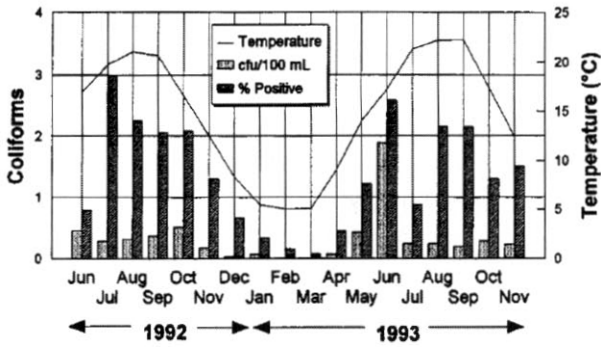


Fig. 1. Relationship between monthly average water temperature and coliform occurrence (LeChevallier et al., 1996).

는 것이 미생물의 검출 및 재성장을 최소화할 수 있는 방법으로 권고되어 왔으며 염소 및 모노클로라민(monochloramine)이 가장 보편적으로 사용되어 왔다. 배·급수관망에서 잔류소독제의 사용 유무는 나라별로 조금 다른 경향을 보이며 미국이나 영국의 경우는 관망에서 미생물학적 수질을 제어하기 위하여 잔류소독제의 사용을 선호하는 반면 네덜란드, 독일, 스위스, 프랑스 등 유럽의 일부 국가에서는 제한적으로 사용하고 있거나 전혀 사용하지 않는 경우가 많다(Kooij et al., 1999).

부유미생물의 불활성화에는 상대적으로 산화력이 강한 염소가 모노클로라민보다 효과적이다(Knox, 1993). 그러나 생물막에 있어서는 염소와 모노클로라민의 생물막 표면과 반응이 서로 다르게 작용하며 생물막내 미생물 불활성화에는 모노클로라민이 염소보다 효과적인 것으로 알려져 있다(LeChevallier et al., 1988). 이는 반응성이 큰 염소의 경우 생물막내로 투과되기 전 대부분이 감소되어 미생물에 큰 영향을 미치지 못하는 반면 모노클로라민은 상대적으로 반응성이 낮아 생물막 내부로 투과하는 능력이 우수하여 미생물 불활성화 효과가 큰 것으로 보고하고 있다.

MacLeod 등(1986)은 미국의 70 정수장을 대상으로 조사한 연구에서 잔류소독제로 염소를 사용하다 모노클로라민으로 전환한 후 coliform 발생 빈도가 56.1%에서 18.2%로 크게 떨어져 배·급수관망에서 미생물 재성장 및 생물막 제어에 모노클로라민이 보다 우수함을 보여주었다. 또한 Fig. 2에서 보여주는 바와 같이 트리할로메탄(trihalomethane)과 같은 소독부산물 생성 및 부식 제어에 있어서도 모노클로라민이 우수하였다(LeChevallier et al., 1990).

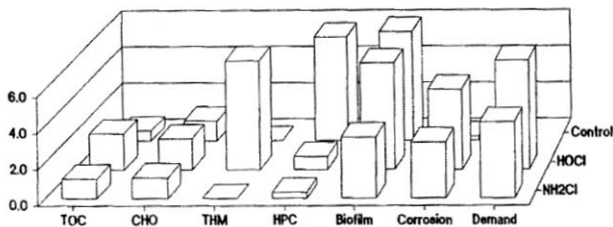


Fig. 2. Summary of water quality concerns relating to choice of disinfectant for biofilm control (LeChevallier et al., 1990).

2.3. 유기물

미생물의 성장에는 영양분이 필수 요소이다. 종속영양세균의 성장에 필요로 하는 탄소:질소:인 비율은 약 100:10:1이며, 대부분 탄소 농도에 의해서 성장 제한을 받는다(LeChevallier et al., 1991). 따라서 배·급수관망에서 생물학적으로 안정한 수질 관리의 지표로 미생물이 실제 성장에 이용할 수 있는 유기물 농도 측정에 초점을 맞추고 있다. Fig. 3은 빈영양상태인 관망에서 미생물의 영양분으로 사용될 수 있는 유기물의 종류를 나타낸다. 용존 유기탄소(Dissolved Organic Carbon: DOC)중에서 생물학적으로 분해 가능한 유기물질(Biodegradable Organic Matter: BOM)의 영역을 말하는 것으로 동화 가능 유기탄소(Assimilable Organic Carbon: AOC)와 생물학적으로 분해 가능한 유기탄소(Biodegradable Organic Carbon: BDOC)로 나타낸다(Huck, 1990).

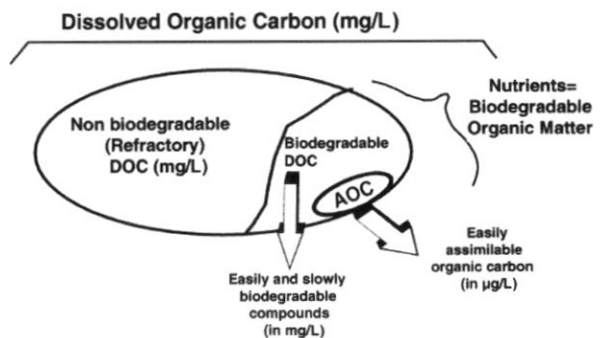


Fig. 3. Type and distribution of dissolved organic matter (Huck, 1990).

배·급수관망에서 종속영양세균의 성장을 제한할 수 있는 AOC의 농도로 잔류소독제가 없는 조건에서는 10 µg/L 이하로(Kooij, 1992), 잔류소독제가 있는 조건에서는 50-100 µg/L 농도 수준(LeChevallier et al., 1991)으로 제안하고 있다. 그러나 배·급수관망에서 유기물 농도를 완벽히 제거하는 것은 거의 불가능한 일로 여겨지고 있으며 일정 농도 수준으로 낮추는 방향으로 초점이 맞추어져 있다.

일부 연구자들은 AOC(및 BDOC) 농도와 미생물 재성장 상호간에 직접적인 상관관계가 있다고 보는 의견(Kooij, 1992)과 직접적인 상관관계가 미약하다고 보는 견해가 상존해 있으며, 최근의 연구에서 수중의 휴믹물질(humic substances)이 생물막의 주요 에너지원임이 밝혀져 수중에서 AOC(및 BDOC)의 농도만으로 미생물의 재성장 및 생물막 형성을 예측하는 것은 실제보다 과소평가될 가능성이 크다고 보고하였다(Camper, 2004).

2.4. 관 재질

배·급수관망은 항상 물과 접촉해 있으며 대부분 잔류소독제가 존재하고 있는 조건으로 마모 및 부식에 대한 안정성은 생물학적으로 안정한 수질 유지에 매우 중요한 요소이다. 미생물이 관 내벽에 부착하고 생물막을 형성하는데 있어 관 재질 및 표면의 거칠기(roughness)는 큰 영향을 미

치며 관 재질에 따라서 형성되는 생물막 농도도 영향을 받는다(Niquette et al., 2000). 예로 부식된 철(iron)관 내벽은 미생물이 부착하기 좋은 장소로 제공될 수 있으며, 잔류소독제에 의한 산화로부터 보호 받을 수 있는 은신처가 될 수 있다(LeChevallier, 1993). 부식된 관 표면에 형성된 결절(tubercles)에서 많은 수의 미생물이 발견되고 있음이 보고되고 있다(Emde et al., 1992; Bensner et al., 2002). 또, Kooij 등(1995)은 관 재질에 따라서 관 표면으로부터 생물학적으로 분해 가능한 물질들이 용출될 수 있고 이로 인해 생물막 형성이 증가될 수 있다는 것을 관찰하였다.

나라별로 사용되고 있는 관의 재질은 다양하며 국내에서 사용 중인 관 종류로는 주철관(33.1%), 합성수지관(19.7%), 스텔레스관(16.8%), 강관(6.4%), 아연도강관(5.3%), 동관(1.0%), 기타(콘크리트, 시멘트관 등) 17.7% 순으로 분포한다(Fig. 4). 배수관은 주철관이 대부분을 차지하였고, 기타관종의 비율이 증가하는 추세에 있다. 급수관은 배수관보다 더 다양한 종류의 관종이 사용되고 있으며, 최근에는 스텔레스관과 합성수지관이 주된 관 종류로 사용되고 있다(환경부, 2002).

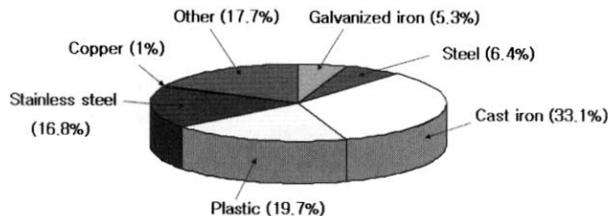


Fig. 4. Percentages of distribution system materials (환경부, 2002).

위에서 살펴본 바와 같이 국내에서도 주철관 및 스텔레스관이 주된 관 종류로 사용되고 있어 관의 부식이 수돗물의 생물학적 안정성에 어떠한 영향을 미치는 파악하고 안정성을 확보하려는 노력이 중요하다. 유럽의 일부 국가에서는 생물학적으로 안정한 관을 사용하려는 노력을 기울이고 있으며 생물학적으로 안정한 관을 평가할 수 있는 시험법을 재검하여 실제 배·급수관으로 사용되는 관을 엄격히 관리하고 있다(Kooij et al., 1999).

3. 생물막 제어를 위한 일반적 전략

3.1. 유기물 농도 조절

정수처리 공정에서 유기탄소의 농도를 줄여 관망내로 유입시키는 것이 미생물의 재성장 및 생물막 형성, 소독부산물 생성, 잔류소독제의 농도 감소를 줄일 수 있는 가장 좋은 방법으로 여겨지고 있으나 경제성이 관련되어 있는 문제로 유기물의 농도를 일정 수준 이하로 낮추는 데는 한계가 있다. 그럼에도 불구하고 유기물의 농도 제어를 통해 생물막 형성을 억제하려는 노력은 계속되어 왔으며, 실제로 생물학적으로 안정된 물의 조건으로 AOC 및 BDOC 농도를 정의하기 위한 여러 시도들이 이루어졌다.

그 예로 관망에서 미생물의 재성장을 제한하기 위한 영양분의 농도로써 AOC 10 $\mu\text{g/L}$ (Kooij, 1992) 이하로, BDOC 0.15 mg/L(Besner et al., 2002) 이하로 제안하였다. Fig. 5는 정수처리공정 후 관망으로 유입되는 AOC 농도와 관망 내에서 감소되는 최대 AOC 농도를 나타내는 그래프로 정수처리공정에서 AOC 농도를 10 $\mu\text{g/L}$ 이하 수준으로 처리하여 보내면 관망 내에서 미생물에 의해 소모되는 AOC 농도가 없음을 보여주는 것으로 미생물의 재성장을 제한 할 수 있음을 말하고 있다(Kooij, 1992).

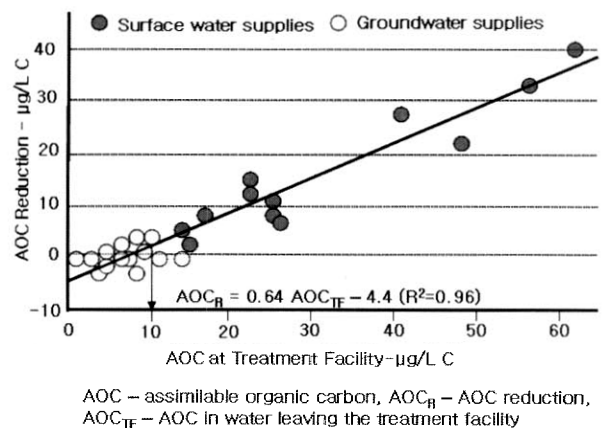


Fig. 5. Maximum decrease in the AOC concentration as a function of AOC concentration of drinking water leaving the treatment facilities (Kooij, 1992).

특히, 네덜란드의 Kooij(1989)는 잔류소독제가 없는 관망에서 AOC 농도와 미생물 재성장 사이에 상관관계가 있으며 이러한 상관관계를 통해 관망내의 생물학적 안정성을 판단하는 증거로 사용할 수 있음을 제시하였다. 또 다른 연구에서는 AOC 농도가 50 $\mu\text{g/L}$ (LeChevallier et al., 1991)와 100 $\mu\text{g/L}$ (Volk et al., 2000b)보다 높을 경우 및 BDOC 농도가 0.15 mg/L 이상일 경우 미생물의 재성장이 급속히 일어날 수 있다고 보고하였으며 언급된 농도 이하로 유지될 경우 미생물의 재성장 문제를 어느 정도 제어할 수 있다고 언급하였다.

단편적인 농도를 제시했던 연구들에 이어 실제 정수장에서 생물학적 처리를 통해 생물학적 분해 가능한 유기물의 농도를 줄임으로 해서 얻을 수 있는 이점들에 대해서 연구가 이루어졌으며 이러한 이점으로 관망에서 생물학적으로 안정된 좋은 수질을 유지할 수 있고(Prevost et al., 1998) 생물막 형성을 최대한 억제할 수 있음을(Volk et al., 1999) 언급하였다. Laurent 등(1999)은 정수장에 나노여과 공정을 도입한 후 관망에서 미생물 검출이 현저하게 줄어들었음을 보고하였으며 관망내로 유기물의 유입을 제한하는 것이 미생물의 재성장 및 생물막 문제를 해결할 수 있는 좋은 방법임을 강조하였다.

반면 위의 의견과 반대되는 의견을 제시하는 연구자도 있다. Camper 등(1996)은 파일럿규모의 모의 관망 실험을 통해 배·급수관망 말단에서 AOC 농도와 미생물 재성장과의 상관관계는 적거나 없다고 보고하였으며, 다만 미생물

재성장은 유입되는 AOC 농도 증가와 관련이 있다고 보고 하였다. Fig. 6은 미국 전역에 분포되어 있는 31개 정수장을 대상으로 AOC 및 BDOC 농도와 미생물 검출률을 조사한 연구로(LeChevallier et al., 1996) 낮은 농도의 AOC 및 BDOC 조건에서 미생물 검출이 적게 발생하는 경향을 보이는 하나 항상 일관성을 보여주지는 않고 있다.

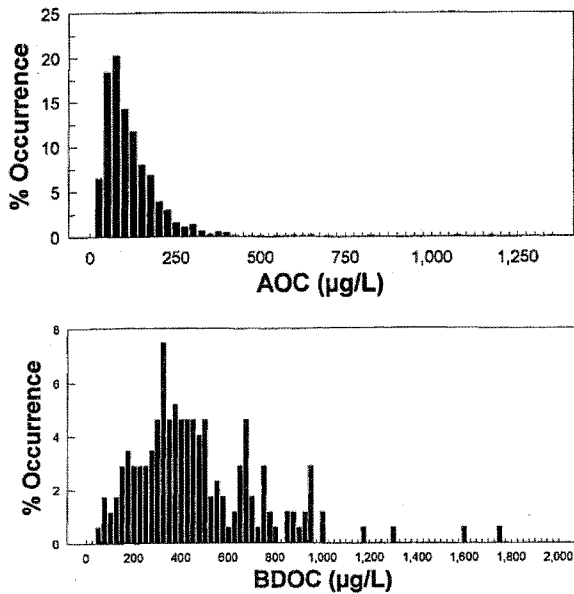


Fig. 6. Distribution of AOC and BDOC values from the 31 sites studied (LeChevallier et al., 1996).

AOC(또는 BDOC) 농도와 미생물 재성장 및 생물학적 안정성과의 일관된 상관관계 부족은 다음의 몇 가지 원인에 기인한다(Camper, 2004). 첫째, 미생물 재성장에 기여하는 유기 탄소의 농도를 실제적으로 나타내는데 있어서 BOM 측정 시료의 수가 불충분하다. 둘째, 미생물의 재 성장에 영향을 줄 수 있는 소독제, 관 재질 등 중요한 다른 인자 간 상호작용이 고려되지 않았다. 셋째, 유기 탄소의 존재가 생물학적 성장을 증진시켰는지에 대해서 명확히 측정되지 않는다.

BOM 농도 측정을 통한 수질 분석에 있어서 전체 수량에 비해 매우 적은 시료에 대해서 검사되는 것으로 전체적인 관망내의 생물학적 안정성을 평가하는데 그 검사 자료의 양이 매우 부족하다. 따라서 일부분의 검사결과를 바탕으로 전체를 평가하는 외삽법 등이 유용하게 사용되었으나 이 역시 효용성에 의문이 던져지고 있다. 더욱이 다양한 관망 구조물 표면에 부착되어 있는 미생물은 관망내의 다양한 요인들에 의해 생성된 것으로 어느 한 요인에 의해 미생물의 재성장 및 생물막 형성을 명확하게 판단하는 것은 어려움이 있다고 보고하였다. Camper(2004)는 관 표면 위에 부착되어 있는 미생물 및 생물막내 미생물에게는 유용하게 사용될 수 있는 휴믹산(humic acid) 형태의 BOM도 AOC(또는 BDOC) 검사에서는 낮게 측정되어 실제 관망내에서 미생물에 이용되고 있는 BOM의 농도보다 과소평가 될 수 있음을 보고하였다. 또한 이러한 결과는 반응성

이 없는 플라스틱 계열의 관보다 철 계열의 관에서 보다 차이가 크게 나타날 수 있다고 말하고 있다.

결론적으로 관망 내 BOM 농도가 높으면 미생물의 재성장 및 생물막 형성에 기여할 수 있으나 BOM의 농도가 미생물의 재성장 및 생물막 형성을 절대적으로 반영하는 것은 아니므로 관망 내 생물학적 안정성을 판단하는데 있어 BOM 농도 이외에 소독제, 관 재질 등 여러 요인들과 함께 포괄적으로 판단하는 것이 필요하다.

3.2. 잔류소독제 종류 및 농도 조절

일반적으로 잔류소독제의 농도가 높으면 미생물의 재성장 및 생물막 형성이 억제될 수 있을 것으로 생각되지만 단순히 잔류소독제의 농도를 높이는 것만으로 생물막 억제는 어려운 것으로 알려져 있다. 이러한 이유는 배·급수관망 내에서 잔류소독제가 미생물과만 반응하는 것이 아니라 유기물, 관 벽 등 여러 가지 인자에 의해 영향을 받기 때문이다. 따라서 잔류소독제의 사용이 생물막을 억제할 수 있는 하나의 방법이 될 수는 있지만 절대적인 것은 아니며, 생물막 억제를 위한 최적의 잔류소독제 선택 및 농도 조절을 위한 연구들이 이루어졌다.

일반적으로 염소가 모노클로라민보다 미생물의 재증식 및 생물막 형성 억제에는 비효과적인 것으로 알려져 있지만(Servais, 1995) 몇몇 연구에서는 생물학적 활성탄 도입 등으로 수중의 유기물 농도가 상당히 낮은 수준으로 유지될 경우 0.05~0.5 mg/L 잔류염소 농도 범위에서 미생물 재성장 및 생물막 형성을 억제하는데 매우 유용하다고 보고하고 있다(Besner et al., 2001; Volk et al., 2000b).

그러나 위의 연구들에서도 잔류염소가 미생물의 불활성화에 모두 기여했다고 확신할 수 없으며 염소에 의해 상처 입은 미생물들이 일반적인 배지 검출법에 의해서 검출이 되지 않는 것일 뿐 완전히 사멸된 것이 아니라는 사실에 보다 비중을 두고 있다.

대조적으로 높은 농도의 잔류염소 유지가 미생물의 재성장 및 생물막 억제에 비효과적이며 심지어 0.6~4.0 mg/L 범위의 높은 잔류염소 농도에서도 미생물이 검출됨을 보고하고 있다(LeChevallier et al., 1987).

관망에서 높은 잔류염소 농도 유지는 맛냄새 문제뿐만 아니라 소독부산물 생성 문제를 야기시키고(Besner et al., 2002) 미생물의 완벽한 제어를 보장할 수 없기 때문에 많은 정수장에서는 대체 잔류소독제를 찾아 왔으며 그 대표적인 것으로 모노클로라민을 들 수 있다.

모노클로라민은 일반적으로 염소보다 약한 산화력을 가져 미생물을 불활성화하는 소독능은 떨어지지만 염소보다 안정하여 관망에서 오랜 시간 그 농도를 유지시킬 수 있다. 이러한 장점 덕분에 염소사용으로 인해 발생했던 관의 부식 문제 및 잔류소독제 농도 유지의 어려움을 겪었던 정수장에서는 모노클로라민의 사용이 늘고 있다(Besner et al., 2002). Fig. 7은 1997년 미국 환경청(USEPA)에서 보고된 자료로 정수장에서 2차 소독제로 염소와 모노클로라민의 사용을 급수인원 규모별로 나타낸다. 소규모의 배급수관망

에서 중, 대 규모의 배·급수관망으로 갈수록 염소의 사용량은 줄고 모노클로라민의 사용량이 증가되고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 모노클로라민으로 전환한 대다수 정수장의 경우 모노클로라민을 미생물 제어를 위해서라기보다는 소독부산물 규제를 맞추기 위해서 전환한 경우가 더 많았다(Besner et al., 2002).

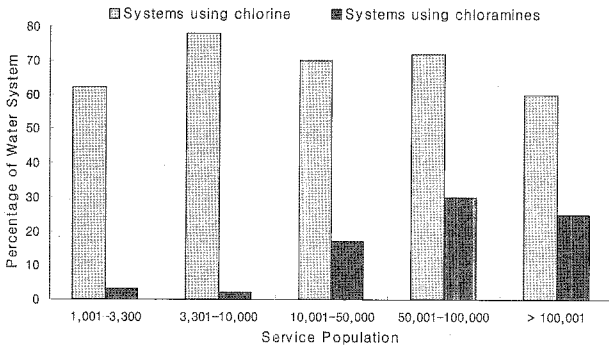


Fig. 7. US community surface water systems using monochloramine as a secondary disinfectant (USEPA, 1997).

모노클로라민의 사용은 여러 실험실 규모(Momba et al., 1999; Camper et al., 2000) 및 실제 규모(Norton et al., 1997; LeChevallier et al., 1996) 모의관망 실험에서 염소보다 미생물을 제어하는데 보다 효과적임을 보여주고 있다. 모노클로라민의 안정성과 생물막을 투과하는 우수한 능력의 조합은 부유세균 및 부착세균 제어에 보다 효과적이다(LeChevallier et al., 1990). 그러나 모노클로라민의 사용도 관망에서 미생물 문제를 완벽히 해결해 주지는 못한다. 모노클로라민의 경우 갑작스럽게 유입된 미생물 제어에 있어 염소보다 효과적이지 못한 점과 질화작용을 야기시킬 수 있다는 단점을 가지고 있다(Wilczak et al., 1996).

국내에서 염소와 모노클로라민이 생물막 형성 억제에 미치는 영향을 연구한 내용으로는 박 등(1993)의 연구가 있으며 모노클로라민이 생물막 억제에 염소보다 효과적임을 보고하였으며, 형성된 생물막을 제거하는데 있어 염소와 모노클로라민을 비교한 연구에서 박 등(2006)은 염소가 보다 효과적임을 보고하였다.

이상에서 살펴본 바와 같이 배·급수관에서 수도물의 생물학적 안정성 유지를 위해 잔류소독제의 사용은 필요하나 높은 농도로 사용될 경우 여러 가지 부작용이 발생하므로 잔류소독제의 사용을 점차적으로 줄여나가는 것이 바람직하다. 잔류소독제의 농도가 감소되었을 경우 잔류소독제 농도 감소에 따른 배·급수관망 내의 생물학적 안정성을 파악하는 일이 필요하며 궁극적으로 잔류소독제 사용이 필요없도록 다른 요인들을 철저히 관리하는 것이 요구된다.

3.3. 생물학적으로 안정한 관

전통적으로 사용되어 온 철(iron)재질의 관은 합성 플라스틱 재질의 관에 비하여 부식 문제가 있어 생물학적으로 안정한 수도물 관리에는 부정적인 면이 크다. 기존에 설치된 철 재질 관의 부식을 방지하기 위해서 다양한 방법들이 사

용되어 왔으며 pH 증가 및 인(phosphates)을 기초로 만든 방청제 첨가 등이 보편적으로 사용되고 있다. 높은 pH는 금속의 용해도를 낮추고 표면부식을 줄이며, 인을 기초로 한 방청제의 사용은 철 표면 부식을 억제하고 부가적으로 잔류염소의 소독능을 높이는 역할을 한다(Volk et al., 2000a).

미국 31개 정수장을 대상으로 조사한 연구에서도 인을 기초로 하는 방청제의 사용과 낮은 미생물 발생률과 관련이 있음을 보여주었다(LeChevallier et al., 1996). 철 재질 관망에서 방청제의 사용이 미생물 발생을 줄일 수 있는 것은 관 표면의 부식을 줄임으로 인해 미생물이 부착하고 숨을 수 있는 공간과 산화철에 의한 미생물 흡착능 및 잔류소독제 감소와 같은 문제점을 줄여주기 때문에 생물학적으로 안정된 수질을 유지할 수 있다(Besner et al., 2002).

철 재질 관과 더불어 이미 오래전부터 합성 플라스틱 재질관도 널리 사용되어 왔다. 이러한 합성 플라스틱 재질관은 철 재질 관보다 부식의 우려가 적어 생물학적으로 안정한 장점이 있지만 생물학적으로 완벽하게 안정하다고 할 수는 없다. 합성 플라스틱 재질 관 및 관 내부 코팅제들도 관망 내에서 생물학적으로 분해 가능한 물질을 수증으로 용출시킬 수 있다.

이러한 이유로 유럽의 여러 국가에서는 이미 오래전부터 생물학적으로 안정한 관을 사용하려는 노력을 기울여 왔으며 나라별로 생물학적으로 안정한 관을 평가할 수 있는 방법들이 개발되어 왔다. 합성 플라스틱 재질 관의 생물학적 안정성 평가 방법으로 독일에서는 관 표면에 형성되는 슬라임(slimes)의 형성 정도를 측정하여 평가하고 있으며, 네덜란드에서는 관 표면에서 생물막 형성 잠재력(biofilm formation potential: BFP)을 측정하여 평가하고 있다(Kooij et al., 1999). 특히, 네덜란드에서는 90년대 초반부터 이러한 평가법을 이용한 기준을 도입하여 생물학적으로 안정성이 우수한 재질의 관을 사용함으로써 잔류소독제 없이 수도물을 공급할 수 있게 하는데 크게 기여하였다.

Fig. 8은 합성플라스틱 재질 관들에 대한 생물막 형성 잠재력을 평가한 결과로 평가하고자 하는 관 표면에 일정 시간동안 주어진 실험조건에서 형성된 생물막 농도($\text{pg/cm}^2 \cdot \text{dATP}$)를 측정하는 것으로 BFP 수치가 낮을수록 생물학적으로 안정한 관으로 평가된다(Kooij et al., 1999). 이러한 평가법은 실제 관에서 떼어낸 시편에 대해서 다양한 관

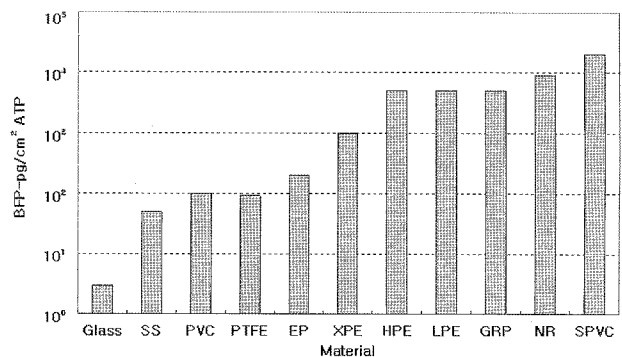


Fig. 8. Biofilm formation potential values of synthetic materials (Kooij et al., 1999).

재질의 BFP 값과 직접적인 비교가 가능하며 현장에 사용될 관에서 생물막이 형성될 것으로 판단되는 기간을 예측하는데 유용하게 사용될 수 있다.

생물학적으로 안정한 관 재질을 찾고 그러한 관을 사용하려는 일부 유럽 국가들의 노력은 잔류소독제 없는 배·급수관망을 현실화시켰다. 한편, 관 재료의 사용에 있어서 유럽과 같이 생물학적으로 안정한 관을 선택할 수 있는 제도가 없는 국내에서는 우리 실정에 맞는 평가법의 개발 및 규제화가 필요하다. 한편 국내에서도 배·급수관망에서 부식제어의 중요성과 생물막 제거의 필요성을 강조하는 보고가 있었으며(염, 2004), 부식이나 생물막이 형성되기 이전에 적용할 수 있는 방법들에 대한 연구가 중요함을 강조하였다.

4. 생물막 제어를 위한 혁신적(innovative) 전략

4.1. 세포 신호 전달 물질

배·급수관망에서 생물막 제어를 위한 많은 연구와 노력에도 불구하고 생물막 제어는 매우 어려운 일로 남아있다. 최근에는 생물막 문제 해결을 위해 보다 진보된 새로운 전략이 제안되고 연구되어 왔다. 그중의 하나로 생물막 형성 및 유지 과정에서 중요한 역할을 하는 세포 신호 전달 물질(cell signaling compounds)의 길항물질(antagonist)을 이용하여 생물막 형성을 저해하거나 생성된 생물막을 제거하고자 하는 연구들이 시도되어 왔다.

Kline 등(1999)은 비선택성 길항 신호 전달 물질인 1,2 fluorodecal acyl homoserine lactone(FOdHSL)을 합성하여 *Pseudomonas aeruginosa* 생물막 형성 억제에 효과가 있음을 보고하였다(Fig. 9). 또 다른 길항 신호 전달 물질인 wrs-I-51은 미국 몬타나 대학 화학부에서 디자인된 물질로 세포의 신호 전달을 교란시켜 생물막 형성을 억제하는데 효과가 있음을 보고하였다(Kline et al., 1999). Shirliff 등(2002)은 생물막에서 세포가 탈리되는데 관여하는 신호 전달 물질을 합성하거나 생물막 형성 단계에서 분비되는 신호 전달 물질의 구조를 변형시킨 길항물질을 이용하면 생물막을 제어할 수 있을 것이라는 생각에서 이러한 물질을 합성하여 평가하는 연구를 수행하였다. 최근에 길항 세포

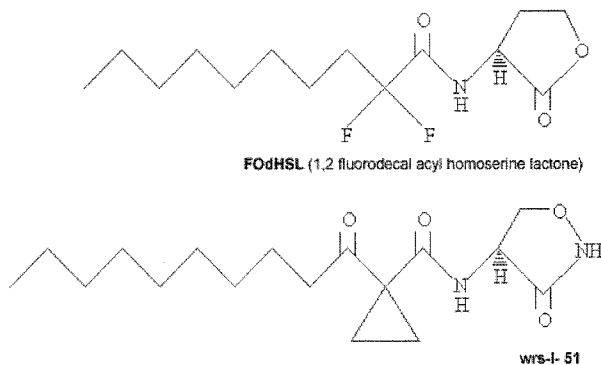


Fig. 9. Structures of cell signaling molecules (Kline et al., 1999).

신호 전달 물질이 배·급수관망의 생물막 제어에도 효과가 있는지를 확인하기 위하여 모의 배·급수관망을 이용하여 실험을 수행하였다(Bargmeyer et al., 2004).

그러나 선행연구에서 *Pseudomonas aeruginosa* biofilm에서 생물막 제거에 효과를 보였던 FODHSL, wrs-I-51 물질들도 배·급수관망에서 기원한 미생물을 이용한 생물막에서는 길항 신호 전달 물질에 의한 생물막 제어 효과가 매우 미미한 것으로 나타났다(Fig. 10). 이들 길항 세포 신호 전달 물질들을 실제 배·급수관망에 적용할 수 있는지 여부는 추후로 하고 이러한 시도들이 생물막 제어의 수단으로 사용될 수 있는지 기초 연구가 진행 중인 단계이며 보다 효과가 좋은 길항 세포 신호 전달 물질들을 합성하려는 노력이 이루어지고 있다.

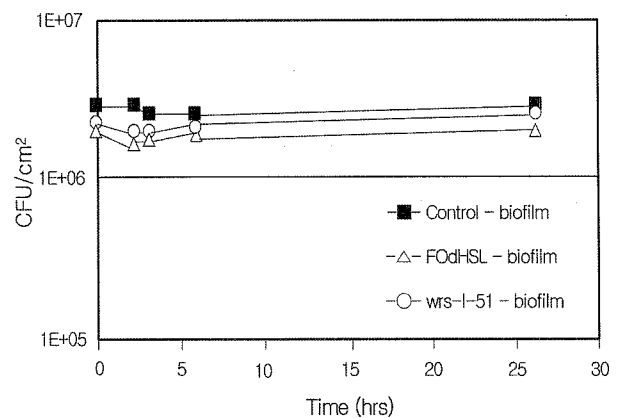


Fig. 10. Comparative biofilm HPC data for control and signaling molecules treatment (Bargmeyer et al., 2004).

4.2. 생전기 효과(bioelectric effect)

생물막이 소독제에 대해 강한 저항성을 가지는 이유로 소독제가 생물막 내부로 침투하기가 어렵기 때문으로 알려져 있다. 이러한 이유에서 소독제가 생물막에 대한 소독 효과를 높이기 위한 조치로 생물막 주변에 약한 전기를 걸어주면 소독제의 소독능이 향상되는 결과가 알려져 있다(Blekinsopp et al., 1992; Costerton et al., 1994a). 생전기 효과라 불리는 이 효과에는 주로 항생제에 대해서 생물막의 소독능을 평가하는 연구가 주를 이루었다. Stewart 등(1999)은 약한 직류 전류(DC electric current)에 의해서 생물막에 대한 항생제의 효과가 향상되는 결과를 보고하였다. 이 연구에서는 직류 전류에 의해 산소가 전기분해 되어 superoxide anion, peroxide, hydroxyl radicals과 같은 반응성이 큰 활성산소 종들이 생성되었을 가능성을 언급하였다. 또 다른 연구에서는 전기를 걸어주었을 경우 전해질용액 성분의 전기분해로 인해 새로운 물질이 생성될 수 있으며 염소 이온이 존재하는 용액의 전기분해 시 염소가 발생할 수 있다고 보고하였다(Davis et al., 1994). 이후의 연구에서 비교적 높은 360 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 전류를 걸어준 조건에서, 생물막 억제를 위해 필요한 최소 항생제 농도의 적용보다 5배 이상 효과적인 것으로 보고하였다(McLeod et al., 1999). 이처럼 아직까지 생전기 효과 현상은 여러 연구자들에 의해

보고되고 있으나 그 원리에 대해서는 논쟁의 여지가 남아 있으며 추가적인 연구가 필요하다.

그럼에도 불구하고 bioelectric effect의 긍정적인 연구결과로부터 bioelectric effect를 배·급수관망에서 생물막 제어를 위한 수단으로 활용하고자 하는 연구가 수행되었다(Shirtliff et al., 2005). Fig. 11은 bioelectric effect를 배·급수관망에서 생물막 제어를 위한 수단으로 활용할 수 있는지를 확인해 보고자 annular reactor에 직류전류를 걸어 실험한 결과이다. 염소만 단독 처리한 것과 염소와 bioelectric effect를 함께 처리한 결과의 비교를 통해 bioelectric effect의 효과를 확인하고자 하였다. 그러나 Fig. 11에서 보는바와 같이 실제 관망에서 생물막 제어를 위한 수단으로 bioelectric effect는 매우 미미하여 실제에 활용하기 위해서는 아직까지 해결해야 할 문제점들이 많이 남아있다.

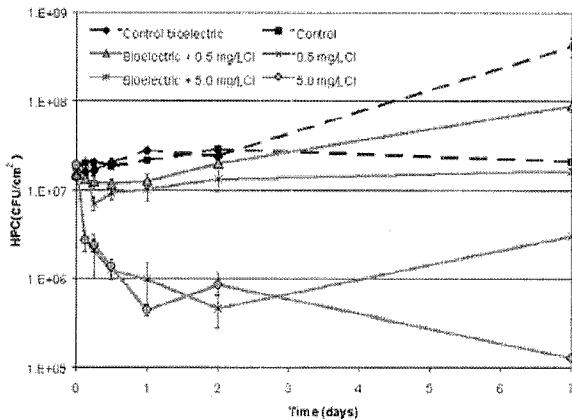


Fig. 11. Comparative biofilm HPC data for the indicated chlorine and current treatments (Shirtliff et al., 2005).

4.3. 항균(biocidal) 물질

배·급수관망에서 생물막 형성 방지를 위해 가장 효과적이고 실현가능한 방법은 항균 물질을 이용하여 관 내부를 코팅하는 것이다. 미생물이 관 표면에 부착할 수 없게 만들 수 있다면 가장 근본적인 해결책이 될 것이다. 관 표면에 코팅하여 항균성능을 나타낼 수 있는 물질로 N-halamine 유도체가 잘 알려져 있다. N-halamine 유도체의 항균성능은 Kaminski 등(1976)에 의해 처음으로 비교연구가 보고되었으며, 반응성이 큰 염소와 결합할 수 있는 능력을 가지며 활성 염소이온의 대체 안정제로 사용될 수 있다. 그 후의 연구에서는 N-halamine에 heterocyclic carbon nitrogen 혹은 oxygen ring이 첨가된 반 수용성 화합물이 물의 소독에 응용되었다(Williams et al., 1987). Fig. 12는 이후 개발된 불용성 N-halamine 화합물로 항균 물 필터에 응용되어 표면에 접촉되는 미생물의 불활성화를 확인하였다(Sun et al., 1994).

최근에는 유리, 플라스틱, 섬유 등 다양한 기질에 poly-N-halamine을 코팅하여 표면을 항균 처리하는 연구들이 수행되었으며 미생물 평가에서도 매우 우수한 항균성능을 보이는 것으로 보고되고 있다(Eknoian et al., 1998). 최

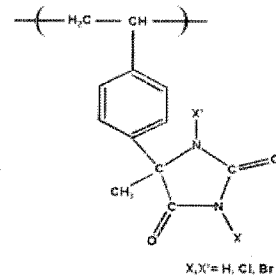


Fig. 12. Structure of N-halamine polymer polyCl (Sun et al., 1994).

근에는 polyurethane polymer 뼈대에 N-halamine hydantoin monomer를 결합하여 배·급수관망 코팅용으로 개발되어 상업적으로 널리 사용되고 있다(Eknoian et al., 1998).

이러한 연구 결과를 기초로 N-halamine 화합물이 배·급수관망에서 생물막 제어를 위한 수단으로 얼마만큼의 효과가 있는지 연구가 수행되었다(Bargmeyer et al., 2004). 항균성능이 검증된 N-halamine 코팅제로 코팅된 시편을 이용하며 실제 배·급수관망과 유사한 조건에서 실험을 하였다. 그러나 Fig. 13에서 보는 바와 같이 N-halamine이 코팅되어 있지 않은 control 결과와 비교해 볼 때 그 효과가 미미하였다. 배·급수관망은 잔류소독제가 존재하는 복잡한 환경이므로 보다 다양한 조건에서 추가적인 실험들이 수행될 필요가 있으며, 보다 항균효과가 뛰어난 신물질 개발의 필요성도 중요하다.

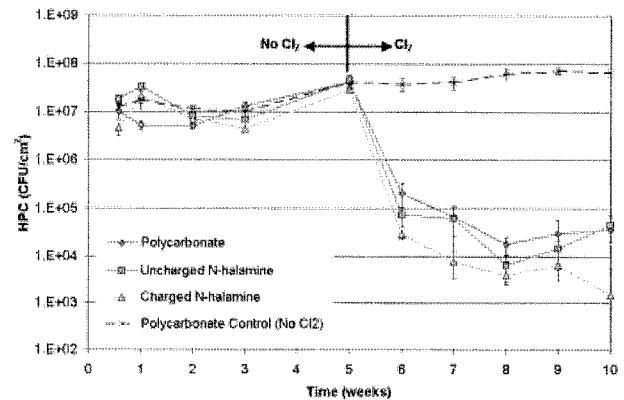


Fig. 13. Comparative biofilm HPC data for control and N-halamine coating, 1 mg/L chlorine treatment (Bargmeyer et al., 2004).

5. 국내 관망 생물막 연구의 현황과 과제

국내에서 생물막 연구는 10여 년 전 서울시 일련의 배·급수관망을 대상으로 배·급수관망에서 미생물 분포, 생존 및 성장, 상호작용, 생물막 형성 등의 미생물 생태를 규명하고자 하는 연구가 처음으로 수행되었다(박 등, 1993). 연구를 통해 배·급수관망에서 미생물 재성장 및 생물막 형성을 방지하기 위해서는 일정 농도의 잔류소독제의 유지가 필요하고, 잔류소독제로는 염소보다 모노클로라민이 보다 효과적이며 유기물의 농도를 줄이기 위하여 고도정수공정

을 도입하는 것이 필요하다는 내용을 언급하였다. 이후 배·급수관망에서 미생물 재성장 문제를 연구하기 위한 몇몇 기초 연구가 수행되었다. 그러나 이러한 연구들도 단편적인 수질 조건에 따른 미생물 성장을 살펴본 것으로 관망에서 생물막 형성을 제어하는 연구로는 충분하지 않았다.

이상에서 살펴본 바와 같이 국내의 생물막 연구는 매우 한정적으로 수행되어 왔으며, 연구의 내용도 배·급수관망의 수질과 생물막 형성과의 관계를 파악하는 기초연구 수준에 머물러 있다. 아직도 국내에서는 배·급수관망에서 발생하는 생물막 문제에 대해서 인식이 낮아 생물막 제어를 위한 혁신적인 연구는 아직 이루어지지 못하고 있다. 많은 연구를 통해 잔류소독제 없는 배·급수관망을 운영하는 유럽의 국가에 비교해 볼 때 안전한 수돗물을 공급하려는 노력이 많이 요구되는 시점이라고 하겠다. 한순간에 모든 것을 해결할 수는 없으므로 유럽에서처럼 생물학적으로 안전한 관 재질을 개발하고 사용하려는 노력부터 기울여야 할 것이다.

6. 요약 및 결론

본문에서 살펴본 바와 같이 배·급수관망에 형성된 생물막을 완전히 제거하는 것은 거의 불가능한 것으로 여겨진다. 따라서 관망에서 생물막 연구는 생물막을 제거하려는 노력보다 생물막이 형성되지 않도록 하는데 연구 초점이 맞추어져야 할 것이다. 새로 설치되는 관망에서 생물막 형성을 제어하기 위해서는 미생물의 먹이가 될 수 있는 영양물질의 농도를 낮추고, 미생물의 유입을 막기 위한 최적화된 소독처리 및 잔류소독제를 적용하고, 생물학적으로 안정한 관의 사용을 통해 생물막 형성을 최대한으로 억제시키는 것이 최선의 방법이라 할 수 있다. 실 예로 네덜란드와 스위스 등 유럽의 일부 국가에서는 이미 십여 년 전부터 잔류소독제 사용 없이 생물학적으로 안정한 수돗물 공급을 현실화시켜 왔다. 이렇게 되기까지 생물막에 관련된 수많은 기초연구와 현장연구가 있었기에 가능한 결과로 앞으로 우리나라에서 현실로 실현하기 위해서는 배·급수관망에서 생물막을 제어하려는 많은 관심과 연구투자가 필요하다 하겠다. 생물막 제어를 위한 혁신적인 세포 신호 전달 물질, bioelectric effect 및 항균코팅의 적용 결과에서도 생물막 제어 효과가 매우 미미한 것으로 보고하고 있어 배·급수관망에서 생물막 문제 해결의 어려움을 다시 한 번 말해준다. 이러한 어려움에도 불구하고 안전한 수돗물을 공급하기 위해서는 배·급수관망에서 생물막 문제의 중요성을 인식하고 이를 해결하려는 노력과 함께 많은 연구 투자가 이루어져야 할 것이다.

사 사

본 연구는 2006년 두뇌한국 21사업 및 환경부 Eco-STAR Project인 수처리선진화사업단(과제번호: I2WATERTECK 04-3)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 문성민, 조민, 윤재용, 낮은염소농도와 잔류염소 유지패턴이 관망 생물막 존재나 성장에 미치는 영향, *대한상하수도학회·한국물환경학회 공동 춘계학술발표회* 논문집, p. 145 (2006).
- 박성주, 조재창, 김상종, 상수도계통에서의 세균 분포 및 변화, *KOR. JOUR. MICROBIOL.*, **31**(3), pp. 245-254 (1993).
- 박세근, 최성찬, 김영관, 모형 수도관에서 염소와 모노클로라민에 의한 생물막 제거 특성 비교, *대한환경공학회지*, **28**(1), pp. 26-33 (2006).
- 염철민, 상수도관망에서 부식제어 및 생물막 제거에 관한 문헌적 고찰, *한국물환경학회지*, **20**(5), pp. 391-396 (2004).
- 이지형, 김동윤, 수도관 시편에서 염소살균에 의한 미생물 성장제어와 미생물 종 고찰에 관한 연구, *대한환경공학회지*, **19**(9), pp. 1205-1216 (1997a).
- 이지형, 안지숙, 김동윤, 수도관 재질에서 BDOC 농도에 따른 미생물 성장에 관한 연구, *대한환경공학회지*, **19**(3), pp. 403-414 (1997b).
- 환경부, *상수도통계* (2002).
- Bargmeyer, A. M., Shirliff, M. E., Butterfield, P. W., Camper, A. K., Friedman, M. and Boyd, G. R., *Innovative Biofilm Prevention Strategies*, AWWA Research Foundation, pp. 1-46 (2004).
- Besner, M. C., Gauthier, V., Barabeau, B., Millette, R., Chapleau, R. and Prevost, M., Understanding Distribution System Water Quality, *J. AWWA*, **93**(7), pp. 101-114 (2001).
- Besner, M. C., Gauthier, V., Servais, P. and Camper, A. K., Explaining the Occurrence of Coliforms in Distribution Systems, *J. AWWA*, **94**(8), pp. 95-109 (2002).
- Blenkinsopp, S. A., Khoury, A. E. and Costerton, J. W., Electrical Enhancement of Biocide Efficacy Against *Pseudomonas aeruginosa* Biofilms, *Applied and Environmental Microbiology*, **58**(11), pp. 3770-3773 (1992).
- Camper, A. K., Involvement of Humic Substances in Regrowth, *International Journal of Food Microbiology*, **92**, pp. 355-364 (2004).
- Camper, A. K. and Jones, W., *Factors Affecting Microbial Growth in Model Distribution Systems*, AWWA Research Foundation, pp. 1-12 (2000).
- Camper, A. K., Jones, W. L. and Hayer, J. T., Effect of Growth Conditions and Substratum Composition on the Persistence of Coliforms in Mixed Population Biofilms, *Applied and Environmental Microbiology*, **62**, pp. 4014-4018 (1996).
- Costerton, J. W., Ellis, B., Lam, K., Johnson, F. and Khoury, A. E., Mechanism of Electrical Enhancement of Efficacy of Antibiotics in Killing Biofilm Bacteria, *Antimicrob. Agent Chemother*, **38**(12), pp. 2803-2890 (1994a).
- Costerton, J. W., Leqandowski, Z., Debeer, D., Caldwell, D., Korber, D. and James, G., Biofilms, the Customized Microniche, *Journal of Bacteriology*, **176**, pp. 2137-2142 (1994b).
- Davis, C. P., Shirliff, M. E., Trieff, N. M., Hoskins, S. L. and Warren, M. M., Quantification, Qualification, and Microbial Killing Efficiencies of Antimicrobial Chlorine-based Sub-

- stances Produced by Iontophoresis, *Antimicrob. Agent Chemother.*, **38**(12), pp. 2768-2774 (1994).
- Eknoian, M. W., Putman, J. H. and Worley, S. D., Monomeric and Polymeric N-halamine Disinfectants, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, **37**(7), pp. 2873-2877 (1998).
- Emde, K. M., Smith, D. W. and Facey, R., Initial Investigation of Microbially Influenced Corrosion (MIC) in a Low-temperature Water Distribution System, *Wat. Res.*, **26**(2), pp. 169-175 (1992).
- Flemming, H. G., Szewzyk, U. and Griebe, T., *Biofilms: Investigative Methods & Applications*, Technic, Pennsylvania, U.S.A., pp. 1-3 (2000).
- Geldreich, E. E. and Rice, E. W., Occurrence, Significance and Detection of *Klebsiella* in Water Systems, *J. AWWA*, **79**, pp. 74-80 (1987).
- Hamilton, W. A., *Biofilms and Microbially Influenced Corrosion, in Microbial Biofilms*, Cambridge University Press, p. 171 (1985).
- Havelaar, H. H., Versteegh, J. F. M. and During, M., The Presence of *Aeromonas* in Drinking Water Supplies in the Netherlands, *Zentralblatt fur Hygiene und Umweltmedizin*, **190**, pp. 236-256 (1990).
- Huck, P. M., Measurement of Biodegradable Organic Matter and Bacterial Growth in Drinking Water, *J. AWWA*, **82**(7), pp. 78-85 (1990).
- Kaminski, J. J., Huycke, M. M., Selk, S. H., Bodor, N. and Higuchi, T., N-halo Derivatives v: Comparative Antimicrobial Activity of Soft n-chloramine Systems, *Journal of Pharmaceutical Sciences*, **65**(12), pp. 1737-1742 (1976).
- Kline, T., Bowman, J., Iglewski, B. H., Kievit, T. D., Kakai, Y. and Passador, L., Novel Synthetic Analogs of the *Pseudomonas* Autoinducer, *Bioorg. Med. Chem. Lett.*, **9**(24), pp. 3447-3452 (1999).
- Knox, H. B., Biofouling Control with Low Levels of Copper and Chlorine, *Biofouling*, **7**, pp. 157-166 (1993).
- Kooij, D. V. D., The Effects of Ozonation, Biological Filtration and Distribution on the Concentration of Easily Assimilable Organic Carbon (AOC) in Drinking Water, *Ozone Sci. Engrg.*, **11**, p. 297 (1989).
- Kooij, D. V. D., Assimilable Organic Carbon as an Indicator of Bacterial Regrowth, *J. AWWA*, **84**, pp. 57-65 (1992).
- Kooij, D. V. D., Lieverloo, J. H. M. V., Schellart, J. and Hiemstra, P., Maintaining Quality Without a Disinfectant Residual, *J. AWWA*, **91**(1), pp. 55-64 (1999).
- Kooij, D. V. D., Veenendaal, H. R., Baars-Lorist, C., Klift, D. W. V. D. and Drost, Y. C., Biofilm Formation on Surfaces of Glass and Teflon Exposed to Treated Water, *Wat. Res.*, **29**(7), pp. 1655-1662 (1995).
- Laurent, P., Servais, P., Gatel, D., Randon, G., Bonne, P. and Cavard, J., Microbiological Quality Before and After Nanofiltration, *J. AWWA*, **91**, pp. 62-72 (1999).
- LeChevallier, M. W., Examining the Relationship between Iron Corrosion and the Disinfection of Biofilm Bacteria, *J. AWWA*, **85**(7), p. 111 (1993).
- LeChevallier, M. W., Babcock, T. M. and Lee, R. G., Examination and Characterization of Distribution System Biofilms, *Applied and Environmental Microbiology*, **53**(12), pp. 2714-2724 (1987).
- LeChevallier, M. W., Cawthon, C. D. and Lee, R. G., Factors Promoting Survival of Bacteria in Chlorinated Water Supplies, *Applied and Environmental Microbiology*, **54**, pp. 649-654 (1988).
- LeChevallier, M. W., Lowry, C. D. and Lee, R. G., Disinfecting Biofilms in a Model Distribution System, *J. AWWA*, **82**(7), pp. 87-94 (1990).
- LeChevallier, M. W., Schulz, W. and Lee, R. G., Bacterial Nutrients in Drinking Water, *Applied and Environmental Microbiology*, **57**(3), pp. 857-862 (1991).
- LeChevallier, M. W., Whlch, N. J. and Smith, D. B., Full-scale Studies of Factors Related to Coliform Regrowth in Drinking Water, *Applied and Environmental Microbiology*, **62**(7), pp. 2201-2211 (1996).
- Lee, D. G., Bacterial Species in Biofilm Cultivated from the End of the Seoul Water Distribution System, *J. Applied Microbiol.*, **95**, pp. 317-324 (2003).
- Lee, D. G., Lee, J. H. and Kim, S. J., Diversity and Dynamics of Bacterial Species in a Biofilm at the End of the Seoul Water Distribution System, *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, **21**, pp. 155-162 (2005).
- Lee, S. H., O'Conner, S. and Banerji, B. K., Biologically Mediated Corrosion and its Effects on Water Quality in Distribution Systems, *J. AWWA*, **72**, pp. 636-645 (1980).
- MacLeod, B. W. and Zimmerman, J. A., Selected Effects on Distribution Water Quality as a Result of Conversion to Chloramine, Proc. AWWA Water Qual. Tech. Conf., Portland, OR (1986).
- McLeod, B. R., Fortun, S., Costerton, J. W. and Stewart, P. S., Enhanced Bacterial Biofilm Control Using Electromagnetic Fields in Combination with Antibiotics, *Methods Enzymol.*, **310**, pp. 656-670 (1999).
- Momba, N. B. M., Cloete, T. E., Venter, S. N. and Kfir, R., Examination of the Behavior of E-coli in Biofilms Established in Laboratory-scale Units Receiving Chlorinated and Chloraminated Water, *Wat. Res.*, **33**(13), pp. 2937-2940 (1999).
- Niquette, P., Servais, P. and Savoie, R., Impact of Pipe Material on Densities of Fixed Bacterial Biomass in a Drinking Water Distribution System, *Wat. Res.*, **34**(6), pp. 1952-1956 (2000).
- Norton, C. D. and LeChevallier, M. W., Chloramination: Its Effect on Distribution System Water Quality, *J. AWWA*, **89**(7), p. 66 (1997).
- Olson, B. H., Assessment and Implications of Bacterial Regrowth in Water Distribution Systems, EPA-600/152-82-072, U. S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH, (1982).
- Percival, S. L., Warker, J. T. and Hunter, P. R., *Microbiological Aspects of Biofilms and Drinking Water*, CRC Press, U. S. A., pp. 61-65 (2000).
- Prevost, M., Rompre, A., Coallier, J., Servais, P., Laurent, P., Clement, B. and Lafrance, P., Suspended Bacterial Biomass and Activity in Full-scale Drinking Water Distribution Systems: Impact of Water Treatment, *Water Res.*, **32**(5), pp. 1393-1406 (1998).
- Servais, P., Comparison of the Bacterial Dynamics in Various French Distribution Systems, *Jour. Water SRT Aqua*, **44**,

- pp. 10-15 (1995).
- Shirtliff, M. E., Bargmeyer, A., and Camper, A. K., Assessment of the Ability of the Bioelectric Effect to Eliminate Mixed-Species Biofilms, *Applied and Environmental Microbiology*, **71**(10), pp. 6379-6382 (2005).
- Shirtliff, M. E., Mader, J. T. and Camper, A. K., Molecular Interactions in Biofilms, *Chem. Biol.*, **9**(8), pp. 857-871 (2002).
- Stewart, P. S., Wattanakaroon, W., Goodrum, L., Fortun, S. M. and McLeod, B. R., Electrolytic Generation of Oxygen Partially Explains Electrical Enhancement of Tobramycin Efficacy Against *Pseudomonas aeruginosa* Biofilm, *Antimicrob. Agent Chemother.*, **43**(2), pp. 292-296 (1999).
- Sun, G., Wheatley, W. B. and Worley, S. D., A New Cyclic N-halamine Biocidal Polymer, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, **33**(1), pp. 168-170 (1994).
- USEPA, *Community Water Systems Survey*, EPA 815-R-97-001a, Washington, (1997).
- Volk, C. J., Dundore, E., Schiermann, J. and LeChevallier, M. W., Practical Evaluation of Iron Corrosion Control in a Drinking Water Distribution System, *Wat. Res.*, **34**(6), pp. 1967-1974 (2000a).
- Volk, C. J. and LeChevallier, M. W., Impact of the Reduction of Nutrient Levels on Bacterial Water Quality in Distribution Systems, *Applied and Environmental Microbiology*, **65**(11), pp. 4957-4966 (1999).
- Volk, C. J. and LeChevallier, M. W., Assessing Biodegradable Organic Matter, *J. AWWA*, **92**(5), pp. 64-76 (2000b).
- Walker, J., Surman, S., and Jass, J., *Industrial Biofouling*, John Wiley & Sons, LTD, pp. 15-38 (2000).
- Wilczak, A., Jaçangelo, J. G., Marcinko, J. P., Odell, L. H., Kirmeyer, G. J. and Wolfe, R. L., Occurrence of Nitrification in Chloraminated Distribution Systems, *J. AWWA*, **88**(7), pp. 74-85 (1996).
- Williams, D. E., Worley, S. D., Barnela, S. B. and Swango, L. J., Bactericidal Activities of Selected Organic N-halamines, *Applied and Environmental Microbiology*, **53**(9), pp. 2082-2089 (1987).