

은 화합물을 이용한 생물막 제어

김재은 · 김지연 · 윤제용[†]

서울대학교 화학생물공학부

(2005년 4월 6일 접수, 2006년 1월 22일 채택)

Disinfection Efficiency of Silver Disinfectants for Biofilm

Jaecun Kim · Jee Yeon Kim · Jeyong Yoon[†]

School of Chemical and Biological Engineering, Seoul National University

ABSTRACT : The industrial systems contain many sites and components susceptible to biofilms formation. Biofilms play an important role in microbial growth and industrial fouling. Thus, the control of the biofilms in industrial systems has been emphasized, however, the efficient controlling method was not provided yet. Since silver compounds have no residual and corrosion problem, the interest for silver compounds as a biofilm control disinfectant has been increased. In this study, we attempted to examine the disinfection ability of silver compounds. The disinfection efficiency of two silver compounds (silver ion and silver oxide) were evaluated for biofilms in comparison with suspended cells using well known indicator microorganisms (*E. coli*, *P. aeruginosa*) and compared with that of chlorine. Silver compounds were found to be effective in inactivating *E. coli* and *P. aeruginosa* biofilms. The reason for superiority of silver compounds as biofilm disinfectant was suggested by that silver can penetrate into the inner biofilm matrix faster than chlorine without consumption. This study reports that the disinfectant which is highly effective in inactivating the suspended cells in water becomes the less effective for controlling biofilm because of its high reactivity. This results imply that the effective strategy for biofilm control can be achieved by considering thoroughly the chemical nature of disinfectants and biofilm structure and the reactivity between them.

Key Words : Silver, Chlorine, Biofilm Control, *E. coli*, *P. Aeruginosa*

요약 : 대부분의 산업 시설에서는 biofouling과 부식 등의 문제가 발생하는데, 이러한 현상의 주된 원인은 생물막의 형성이라고 알려져 있다. 특히 경제적인 문제뿐 아니라 수도 관망과 의료시설 등에서 형성된 생물막은 건강상의 문제점을 초래할 수 있다. 이제까지 생물막 형성을 제어하기 위해 많은 연구들이 이루어져 왔지만, 현재까지 효과적인 방안이 정립되지 못하였다. 본 연구에서는 비산화성 소독제인 은 화합물을 효과적인 생물막 소독제로 제시하고자 한다. 은은 반응성이 약해서 물 속의 병원성 미생물을 소독하는데 크게 효과적이지 못하지만, 다른 소독제와 달리 인체에 무해하고, 소독 부산물을 생성시키지 않으며, 안정성이 뛰어나 잔류 효과가 크다는 점에서 2차 소독제로써 가능성을 인정받고 있다. 은 이온과 산화 은을 이용하여 생물막과 수중 미생물에 대한 소독능을 평가한 결과, 은의 약한 반응성이 생물막 소독에는 오히려 장점으로 작용하는 것으로 나타났다. 지표 미생물 (*E. coli*, *P. aeruginosa*)의 생물막에 대해서 염소에 비해 은이 비슷하거나 오히려 뛰어난 소독능을 보였다. 이는 염소에 비해 반응성이 약한 은이 생물막 외부에서 소모되지 않고 생물막 내부로 잘 침투되었기 때문으로 보인다.

주제어 : 은, 염소, 생물막 제어, 대장균, 녹농균

1. 서론

생물막은 표면에 붙어있는 미생물 군집체이다. 각각의 미생물 군집은 미생물의 대사과정과 주위 환경에서 얻어지는 세포의 고분자물질(EPS, Extracellular Polymeric Substance)로 둘러싸여 있으며, 표면 성질이나 주변 환경에 크게 구애 받지 않고 수분이 존재하면 어디서나 존재한다. 이러한 생물막은 매우 광범위하고 비선택적으로 존재하기 때문에 여러 가지 문제를 야기시킬 수 있다. 생물막은 산업 시설에서 biofouling과 부식을 일으켜 경제적 손실을 야기하고, 수도관망

에서는 부식과 미생물 오염을 일으킨다는 점 등에서 여러 분야에서 중요한 문제가 되어왔으며 생물막 형성을 방지하고 생성된 생물막을 제어하는 것이 요구되고 있다.^{2-6,11,17)}

그러나 생물막은 물속에 있는 미생물과 달리 소독제에 대한 내성이 매우 강하다고 알려져 있다.^{5,6)} 생물막 주위의 세포외 고분자물질이 소독제의 투과를 방해하며, 특히 산화계 소독제의 경우 생물막 내부의 미생물과 반응하기 전에 외부 유기물과 반응하여 소멸되는 비율이 매우 높다. 따라서 생물막 소독을 위해서 많은 양의 소독제를 사용하게 되는데, 소독제로 주로 사용되는 염소의 경우 농도가 높아지면 시설물의 부식과 소독 부산물 문제 등을 야기하게 된다. 이러한 문제점과 소독의 효율 측면에서 산화력이 강한 소독제보다 클로라민같은 산화력이 약한 소독제나 비산화계 소독제가 생물

[†] Corresponding author
E-mail: jeyong@snu.ac.kr
Tel: 02-880-8927

Fax: 02-876-8911

막을 제어하는데 적합하다는 연구들이 이루어지고 있다.^{7,15,16)}

최근에 은 화합물이 인체에 무해하고 안정성이 뛰어나 잔류성이 우수하며, 소독 부산물이나 부식 문제를 일으키지 않는다는 점에서 대표적인 비산화성 소독제인 은의 소독 효과에 대한 관심이 증가하고 있다. 은의 우수한 소독 효과는 많은 문헌들을 통해 보고되어 있는데,^{1,9,10,12,13)} 대부분 물 속에 있는 미생물에 대한 소독 효과를 보고하고 있으며 생물막에 대한 은화합물의 소독 효과는 아직까지 밝혀진 바가 없다.

본 연구에서는 두 가지 종류의 은 소독제(은 이온(Ag⁺), 산화은(AgO))를 사용하여 수중의 미생물과 생물막에 대한 소독 효능을 조사하여 생물막에 대한 은의 소독 효과와 적용 가능성을 밝히고자 하였다. 일반적으로 널리 쓰이는 염소를 은 화합물의 소독능을 평가할 수 있는 비교 지표로 사용하였다. 또한 생물막에 대한 은 소독제와 염소의 소독능을 정량적으로 비교하여 반응성이 다른 두 가지 소독제가 생물막에 미치는 효과를 알아보았다. 지표 미생물로는 *E. coli*(ATCC 8739)와 *P. aeruginosa*(ATCC 700829, 29336)를 사용하였다.

2. 재료 및 실험 방법

2.1. 소독제

실험에 사용한 모든 시약은 초순수를 사용하여 제조하였으며, 모든 유리 초자는 12.5% 질산 용액에 담구어 흡착된 금속을 제거한 후 121°C에서 15분간 멸균하였다. 본 연구에서는 대표적인 은 소독제로써 은 이온과 산화은을 선택하였다. 은 이온과 산화은 용액은 각각 AgNO₃(Aldrich Co., USA)와 AgO(Aldrich Co., USA)를 초순수에 녹여 제조하였다. 염소 용액은 NaOCl(5%, Junsei Co., Japan)를 희석하여 제조하였다. 각각의 소독제의 초기 농도는 1 mg/L as Ag, 1 mg/L as Cl₂로 조절하였다.

2.2. 미생물 배양과 분석

지표미생물로 사용한 *E. coli*(ATCC 8739)와 *P. aeruginosa*(ATCC 700829, 29336) strain은 50 mL Tryptic Soy Broth (TSB)에 각각 접종하여 37°C에서 하룻밤 배양한 후에 원심분리를 통해 정제하였다. 미생물의 정량 분석은 도말평판법(spread plate method)¹⁴⁾를 통해 수행하였다. 각각의 실험 샘플은 적절히 희석하여 Tryptic Soy Agar에 0.1 mL씩 분주하여 문지른 후에 37°C에서 하루 동안 배양하여 콜로니를 계수하였다.

2.3. 생물막 배양 실험 장치

생물막 반응기(Biosurface technologies Co., MT, USA)를 사용하여 *E. coli*와 *P. aeruginosa* 생물막을 제조하였다. 반응기는 폴리카보네이트와 유리 재질이며, 온도를 조절하기 위한 water jacket과 생물막을 배양하기 위한 원통형의 유리관, 폴리카보네이트 재질의 실린더로 이루어져 있다. 생물막 배양을 위해 반응기 내부에 탈부착이 가능한 폴리카보네이트 판(15 cm × 1.2 cm) 20개를 장착하였다. 반응기를 121°C에서

15분간 멸균한 후에 1 L의 1/10 TSB배양액을 반응기에 넣고 각각의 미생물 stock 용액을 1 mL씩 접종하였다. 반응기를 25°C에서 24시간 동안 정체시킨 후에 배양액을 버리고 1/10 TSB배양액을 다시 채운 후 peristaltic 펌프를 이용하여 1 mL/min의 속도로 1/10 TSB배양액을 공급해주었다. 생물막은 25°C에서 약 7일간 배양하였다.

2.4. 수중 미생물 소독 과정

모든 소독 실험은 pH 7.3, 25°C에서 이루어졌다. pH를 유지하기 위해 염소 소독 실험에는 0.5 M 인산 완충 용액, 은 소독 실험에는 0.5 탄산 완충 용액을 사용하였다. 실험은 60 mL pyrex 반응기에 50 mL의 반응 용액을 사용하여 이루어졌다. *E. coli*와 *P. aeruginosa*의 초기 농도는 10⁵에서 10⁶ CFU(colony Forming Unit)/mL로 하였다. 이 후부터 수중 미생물의 소독능 실험을 위한 실험 용액을 편의상 현탁액이라 하겠다.

소독 수준은 실험 초기 접종한 미생물에 대한 각 샘플링 시간에 살아남은 미생물의 비율을 LOG₁₀로 표현하였다. 은 화합물 소독 실험에서 샘플들은 20 μL 14.6% sodium thiosulfate와 10% sodium thioglycolate 용액으로 잔류 은을 중화시켰으며,¹⁰⁾ 염소 소독 실험에는 0.5 M sodium thiosulfate용액 20 μL로 남은 잔류 염소를 중화시켰다. 염소의 농도는 반응 시작 후 서서히 감소하므로 시간에 따른 염소 농도를 N,N-Dimethyl-p-phenylenediamine(DPD) 방법을 사용하여 DR/2010(HACH Co., USA)로 측정하였다. 각 소독제의 소독능은 CT 값(C: 소독제 농도(mg/L), T: 접촉 시간(min))으로 표시하였는데, 염소 농도가 시간에 따라 변하므로 식 (1)과 같이 시간에 따른 평균 농도 값을 사용하여 표현하였다.

$$\bar{C} = (C_0 \int_0^t e^{-kt} dt / t) \quad (1)$$

소독 실험 과정 동안 교반은 증발로 인한 염소 농도 감소를 방지하기 위해서 최소화하였다.

2.5. 생물막 소독 과정

생물막에 대한 은 화합물과 염소의 소독능을 분석하기 위해서 회분식 반응기를 사용하여 실험을 하였다. 생물막 반응기에 각각 1 mg/L 농도의 소독제 용액을 채우고 정해진 시간에 맞춰서 2-3개의 시편을 각각의 중화용액 20 μL가 포함된 인산완충용액 50 mL에 옮겨서 잘 섞어주었다. 시편에 부착된 생물막을 완전히 떼어내기 위해서 시편 표면을 잘 긁어준 뒤에 1분간 sonication(power410, 화신테크, 한국)하였다. Vortex(vortex genie 2, scientific industries, U.S.A.)로 충분히 섞어준 뒤에 시료를 희석하여 Tryptic Soy Agar 평판배지에 도말하였다. 생물막의 초기 농도는 *E. coli*의 경우 1.10 × 10¹¹ CFU/m², *P. aeruginosa* ATCC 700829는 1.83 × 10¹⁰ CFU/m², *P. aeruginosa* ATCC 29336은 4.97 × 10¹⁰ CFU/m²였다.

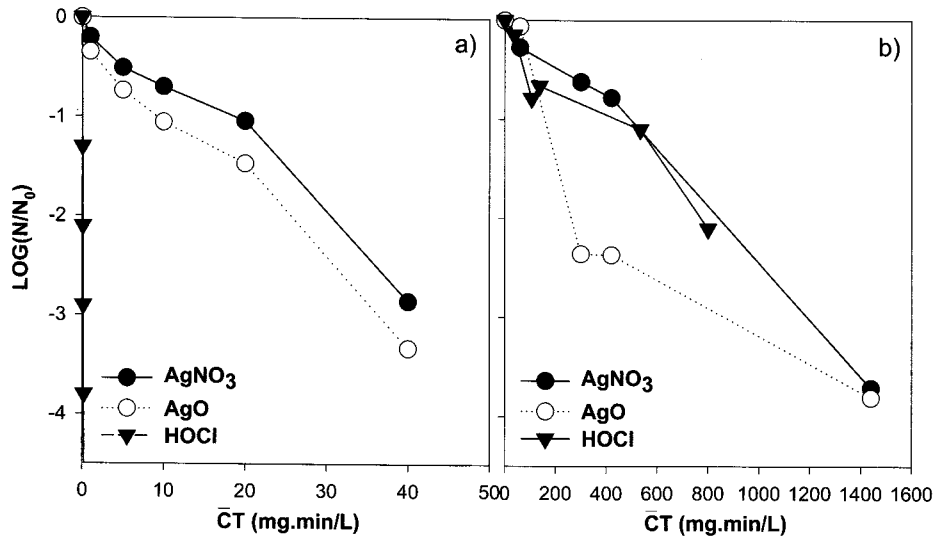


Fig. 1. Comparison of disinfection efficiency for *E. coli* suspension and biofilms using silver ion, silver oxide and chlorine at pH 7.3, 25°C (a) *E. coli* suspension, (b) *E. coli* biofilms.

3. 결과 및 고찰

3.1. 수중 미생물과 생물막에 대한 은 화합물의 소독능

3.1.1. *E. coli*

각각의 소독제의 *E. coli* 현탁액과 *E. coli* 생물막에 대한 소독능은 Fig. 1에서 보듯이 차이가 수백 배 이상 큰 것으로 관찰되었다. 현탁액 상태의 *E. coli*를 2 log(99%) 불활성화 하는데 필요한 CT값은 약 수 수십 mg.min/L 이하인데 반해서(Fig. 1(a)) *E. coli* 생물막을 2 log 불활성화하는데 필요한 CT값의 범위는 수백-수천 mg.min/L이었다(Fig. 1(b)).

현탁액 상태의 소독 실험 결과에서 염소가 세 가지 소독제 중에서 가장 효과적인 것으로 나타났는데 *E. coli*를 2 log 불활성화 하는데 필요한 CT 값이 0.1 mg.min/L이었다. 반면에 은 이온과 산화은의 경우, 각각 28 mg.min/L과 24 mg.min/L

의 CT값이 필요한 것으로 나타났다. 은 화합물 사이에서는 은 이온보다 산화은의 소독능이 다소 좋은 것으로 나타났지만 큰 차이는 보이지 않았다. 생물막 대상의 소독 실험에서는 *E. coli* 생물막 2 log 불활성화에 필요한 CT값이 은 이온, 산화은, 염소 각각에 780, 260, 830 mg.min/L으로 현탁액에 비해 크게 증가하였지만, 염소와 은 화합물 소독제간의 소독능 차이는 크지 않았다.

3.1.2. *P. aeruginosa* ATCC 700829

P. aeruginosa (ATCC 700829)의 경우에도 *E. coli*와 유사한 결과를 관찰할 수 있었다. Fig. 2에서 현탁액 상태의 *P. aeruginosa* (ATCC 700829)를 염소, 은 이온, 산화은으로 소독하였을 경우, 2 log 불활성화에 각각 0.04, 15, 28 mg.min/L의 CT값이 필요하여 염소가 은 이온과 산화은에 비해 높

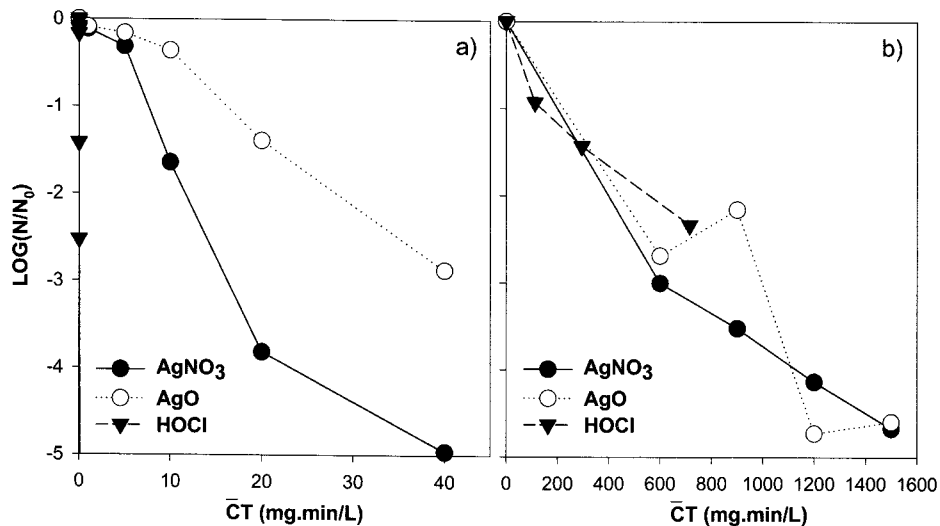


Fig. 2. Comparison of disinfection efficiency for *P. aeruginosa* (ATCC 700829) suspension and biofilms using silver ion, silver oxide and chlorine at pH 7.3, 25°C (a) *P. aeruginosa* (ATCC 700829) suspension, (b) *P. aeruginosa* (ATCC 700829) biofilms.

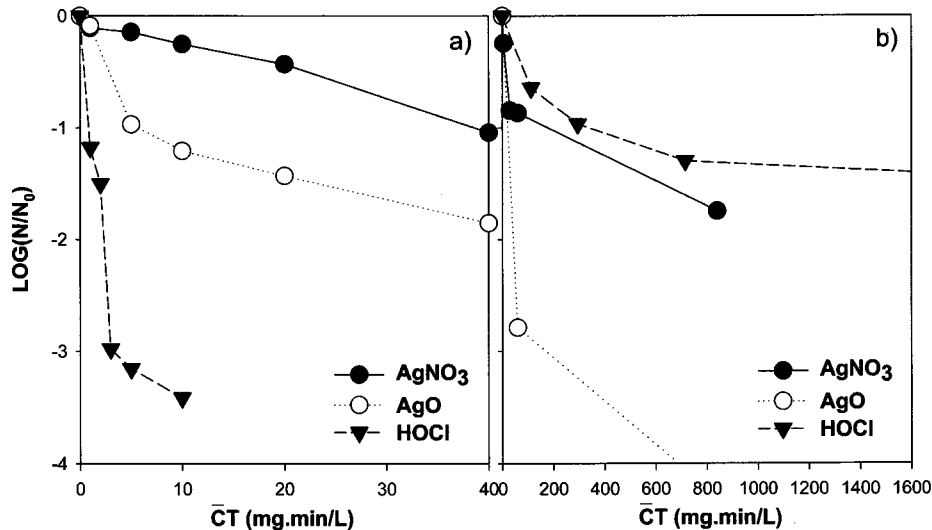


Fig. 3. Comparison of disinfection efficiency for *P. aeruginosa* (ATCC 29336) suspension and biofilms using the silver ion, silver oxide and chlorine at pH 7.3, 25°C (a) *P. aeruginosa* (ATCC 29336) suspension, (b) *P. aeruginosa* (ATCC 29336) biofilms.

은 소독 효과가 있음을 확인할 수 있다. 반면, 생물막을 소독할 때는 CT값이 각각 430, 430, 540 mg.min/L일 때 2 log의 불활성화가 이루어져 염소와 은 화합물의 소독효과가 비슷한 것으로 나타났다. *E. coli*와 유사하게 *P. aeruginosa* (ATCC 700829)에 대한 실험 결과에서도 현탁액 상태에서는 염소와 은 화합물의 소독능 차이가 100배 이상 크지만, 생물막에서는 그 차이가 없는 것을 확인할 수 있었다.

3.1.3. *P. aeruginosa* ATCC 29336

Fig. 3에 *P. aeruginosa* (ATCC 29336) 현탁액과 생물막에 대한 은화합물과 염소의 소독능을 나타내었다. *P. aeruginosa* (ATCC 29336)은 *E. coli*와 *P. aeruginosa* (ATCC 700829)에 비해 상대적으로 소독제에 저항성이 큰 것으로 나타났다. 특히 염소의 경우 현탁액 상태의 *P. aeruginosa* (ATCC 29336) 2 log에 필요한 CT값이 5 mg.min/L로 다른 두 종의 지표 미생물에 비해 10배 이상 큰 것으로 나타났다. 생물막의 경우는 CT이 5000 mg.min/L이상으로 정확한 실험값을 얻어 내지는 못하였으나, 매우 큰 CT값이 요구됨을 확인할 수 있었다. *P. aeruginosa* (ATCC 29336) 생물막에 대한 염소의 소독능은 2 log 불활성화 값을 외삽하여 추정하였다. 그러나 전체적인 소독 경향은 앞 선 두 경우와 비슷하게 나타났다. 은 이온의 경우 필요한 CT값이 현탁액 상태에서는 73 mg.min/L, 생물막에서는 1400 mg.min/L로 나타났으며, 산화은은 각각 45 mg.min/L, 390 mg.min/L의 CT값이 필요한 것으로 나타났다. 요컨대 *P. aeruginosa* (ATCC 29336)의 경우, 현탁액 상태에서는 여전히 염소의 소독능이 우수하였으나 그 차이가 10배 정도로 다른 두 지표미생물에 비해 차이가 작았고, 생물막의 경우에는 오히려 은화합물의 소독능이 염소보다 10배 정도 좋은 것으로 나타났다. 이는 상대적으로 염소에 대한 저항성이 큰 미생물로 구성된 생물막을 제어하는 데에 은 화합물이 효과적으로 작용할 수도 있음을

의미한다.

3.2. 생물막에 대한 은화합물과 염소의 소독능 비교

앞서 살펴 본 *E. coli*와 두 종의 *P. aeruginosa* 현탁액과 생물막에 대한 은화합물과 염소의 소독능을 정리, 비교하여 Table 1에 나타내었다. 각각의 소독제의 현탁액 소독 효율에 대한 생물막 소독 효율을 CT 비율로 표현하였는데, 생물막 상태의 미생물 2 log 소독에 필요한 CT값을 CT_{biofilm}, 현탁액 상태의 2 log 소독에 필요한 CT값을 CT_{sus}로 표시하였다. CT 비율이 클 수록 현탁액 상태일 때보다 생물막 상태일 때 소독하는데 상대적으로 장애요인이 많고, 따라서 생물막 소독에는 비효율적인 소독제라고 평가할 수 있다.

각각의 소독제에 대한 CT 비율은 모든 지표 미생물에 대해 은이온과 산화은의 CT 비율이 10 ~ 30 사이인데 비해, 염소의 경우는 8000이 넘는 수치를 보였다. 예를 들어, 염소의 경우 현탁액 상태의 *P. aeruginosa* (ATCC 700829)를 2 log 감소시키는 데에는 0.04 mg.min/L, 생물막 상태에서는 430 mg.min/L의 CT값이 필요하여 CT 비율 값이 10,750으로 나타났다. 이에 비해서 은 이온의 경우, 현탁액 상태에서는 2 log 감소에 필요한 CT값이 15 mg.min/L, 생물막 상태에서는 430 mg.min/L로 나타내서 CT 비율이 30 정도로 염소에 비해 그 값이 300배 이상 작았다. 산화은의 경우에도 은 이온보다 다소 소독 효능이 떨어지는 것으로 나왔지만 경향은 유사하였다. 산화은으로 *P. aeruginosa* (ATCC 700829) 현탁액을 2 log 감소시키는 데는 28 mg.min/L의 CT값이 필요하였고 생물막 상태에서는 540 mg.min/L의 CT값이 필요하여 CT 비율 값이 19였다. 따라서 절대적인 소독효과는 염소가 크다고 할 수 있으나 생물막에 대한 소독 효율은 낮으며, 은 화합물이 현탁액에 대한 소독 효과는 작지만 생물막에 대한 소독 효율은 더 좋다고 할 수 있다.

이는 염소와 같이 산화력이 강한 소독제는 생물막 내부의 미생물과 직접 반응하기 전에 생물막 외부의 EPS와 같은 유기물질과 반응하여 소독 효율이 크게 감소하는데 반해서, 은 화합물과 같은 비산화계 소독제인 경우에는 유기물질과 쉽게 반응하지 않기 때문에 생물막 내부의 미생물과 직접 반응하는 비율이 높아 소독제 효율이 높은 것으로 해석할 수 있다.^{15,19)} 따라서 이러한 결과는 은 화합물이 물속에 있는 미생물을 소독하는 데는 염소보다 비효과적이지만, 생물막을 소독하는 데는 효과적으로 사용될 수 있다는 것을 의미한다. \bar{CT} 비율로 살펴보면, 생물막 소독에 은 이온보다 산화은이 조금 더 효과적인 것으로 나타났는데 큰 차이는 없는 것으로 보인다.

Table 1. Summary of disinfection efficiency of silver compounds and chlorine for 2 log inactivation of *E. coli* and *P. aeruginosa* in the state of suspension and biofilm

		\bar{CT} value for 2 log inactivation (mg.min/L)		
		AgNO ₃	AgO	Chlorine
<i>E. coli</i>	Suspension	28	24	0.1
	Biofilm	780	260	830
	\bar{CT} ratio ($\bar{CT}_{\text{biofilm}}/\bar{CT}_{\text{sus}}$)	28	11	8300
<i>P. aeruginosa</i> (ATCC 700829)	Suspension	15	28	0.04
	Biofilm	430	540	430
	\bar{CT} ratio ($\bar{CT}_{\text{biofilm}}/\bar{CT}_{\text{sus}}$)	29	19	10750
<i>P. aeruginosa</i> (ATCC 29336)	Suspension	73	45	5.0
	Biofilm	1400	390	>5000
	\bar{CT} ratio ($\bar{CT}_{\text{biofilm}}/\bar{CT}_{\text{sus}}$)	19	8.7	>1000

3.3. 농도 변화에 따른 생물막 소독능 비교

생물막에 대한 은과 염소의 소독 특성을 좀 더 알아보기 위하여 소독제 농도를 1 mg/L에서 각각 염소 7.5 mg/L와 은 이온, 산화은 10 mg/L로 증가시킨 다음 소독능의 변화를 비교하였다. 지표 미생물로는 *P. aeruginosa* (ATCC 700829) 생물막을 사용하였다. 일반적으로 현탁액 상태의 미생물을 소독 할 때는 소독제의 농도에 관계없이 동일 \bar{CT} 값에 대해서 동일한 소독능을 보인다고 알려져 있는데,⁸⁾ 생물막의 경우에는 염소와 같은 산화성 소독제를 사용할 때 비교적 고농도일 때가 저농도일 때에 비해 효과적인 것으로 알려져 있다.¹⁹⁾ 생물막의 경우에는 소독제가 생물막 내부로 통과하여 내부의 미생물과 접촉하는 정도가 소독제에 따라 달라지기 때문에 소독제 농도에 따른 소독능 변화가 나타난다고 할 수 있다. Fig. 4(a)에서도 확인할 수 있듯이, 반응 초기부터 2 log 감소 때까지는 염소 농도 1 mg/L과 7.5 mg/L 일 때가 유사한 경향을 보이지만, 2 log 이후에는 1 mg/L 농도에서는 더 이상 반응 시간을 증가시켜도 소독 효과가 미미한데 비해 7.5 mg/L의 경우 소독이 더 진행되는 것을 관찰할 수 있다. 이것은 낮은 농도의 염소가 생물막 내부까지 도달하기 전에 EPS유기물과 반응하여 대부분 소모되는데 비해, 높은 농도일 때는 EPS유기물과 반응하고 남은 염소가 생물막 내부 미생물을 소독하는데 쓰일 수 있기 때문으로 해석할 수 있다.¹⁹⁾

반면 은 이온의 경우에는(Fig. 4(b)) 염소와는 반대로 낮은 농도일 때가 오히려 생물막 소독능이 다소 높은 것으로 나타났다. 은 이온은 유기물질과의 반응성이 거의 없으므로 생물막 내부로 확산 혹은 투과될 때, 은의 농도 변화가 거의 없으므로 확산(투과) 시간이 중요한 인자로 작용한 것으로 보인다. 즉 같은 \bar{CT} 값이라도, 은 이온이 1 mg/L일 때의 반응 시간보다 10 mg/L일 때의 반응시간이 1/10배이므로 생물막 내부로 확산(투과)되는 시간이 그만큼 줄어들게 되므로 소독

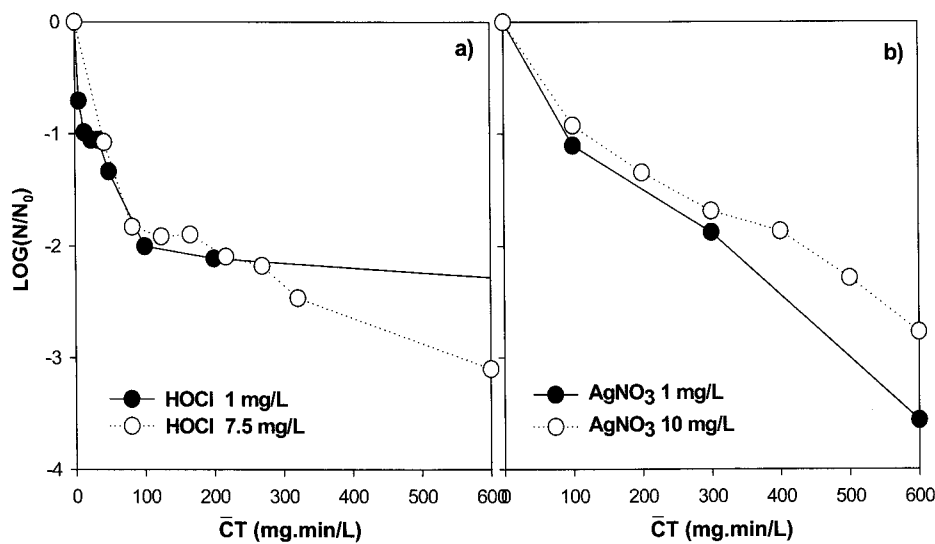


Fig. 4. Effect of disinfectant concentration on disinfection efficiency for *P. aeruginosa* (ATCC 700829) biofilms with chlorine (a) and silver ion (b) at pH 7.3, 25°C.

능이 감소하는 것으로 판단된다. 소독제 농도에 따른 은과 염소의 생물막 소독능 변화가 상반된 경향을 보인 것은 앞서 언급한 반응성의 차이로 설명 가능하며, 이것으로 미루어 소독제의 반응성이 생물막 소독제를 선택하는 데 있어 매우 중요한 요소임을 확인 할 수 있다.

4. 결론

은 화합물은 수중 미생물 소독에는 염소에 비해 효과가 미흡하지만, 생물막 소독에서는 염소에 비해서도 비슷하거나 더 큰 효과를 보인다는 것을 확인할 수 있었다. 이는 상대적으로 염소에 비해 반응성이 작은 은 화합물이 생물막 내부로 쉽게 투과하는 반면 반응성이 큰 염소는 생물막 외부의 EPS 유기물과 반응하여 생물막 내부로 투과하는 것이 어렵기 때문이다. 또한 효과적인 생물막 제어를 위해서는 가급적 고농도의 소독제를 사용하는 것이 좋다는 선행 사례와 달리, 은 화합물과 같은 비산화성 소독제의 경우에는 소독제의 농도가 낮아도 우수한 소독능을 보인다는 것을 확인하였다.

은 화합물이 인체에 무해하고, 안정성이 좋다는 장점에도 불구하고 수중 미생물 소독 효과가 염소에 비해 떨어져서 여전히 현장에서는 염소계 소독제를 주로 사용하고 있는데, 현장에서는 수중에 부유 상태로 있는 미생물보다 생물막에 의해 발생하는 문제점이 더 큰 만큼 은 화합물을 현장에 적용할 수 있을 것으로 보인다.

물론 은 화합물을 소독제로 사용하기 위해서는 경제적인 측면과 소독시간에 대한 염소와의 경쟁력을 고려할 필요가 있으며, 이러한 점에서 대규모의 급수 시스템에 적용하기 보다는 소규모 수처리 시설이나 저수시설, 수영장, 냉각탑 등에 사용하는 것이 더욱 바람직한 방향이라 생각된다. 또한 은 화합물이 생물막 투과와 소독면에서 그 효율이 높다는 특성을 살려 생물막 소독능을 극대화시킬 수 있는 후속 연구가 필요하다.

참고문헌

1. 강환열, 정명주, 정영기, “금속 은으로 제조한 Ag^+ 용액의 항균 효과와 안정성,” 한국생물공학회지, **15**(5), 521~524(2000).
2. 박성주, “상수도 배급수계통에서의 세균 재생장 및 생물막 형성에 관한 연구,” 서울대학교 박사 학위 논문(1993).
3. 박세근, 박재우, 최성찬, 김영관, “모형 수도관에서 유속 변화에 따른 생물막 형성 미생물의 기능적 특성,” 대한환경공학회지, **26**(11), 1251~1258(2004).
4. 이지형, 김동윤, “수도관 시편에서 염소살균에 의한 미생물 성장 제어와 미생물 종 고찰에 관한 연구,” 대한환경공학회지, **19**(9), 1205~1216(1997).
5. Allison, D. G., Maira, L. T., Gilbert, P., “Antimicrobial resistance of biofilms,” *Biofilms: recent advances in their study and control*, Harwood Academic Publishers, Amsterdam, Netherlands, pp. 149~166(2000).
6. Donlan, R. M., “Biofilm control in industrial water systems: approaching an old problem in new ways,” *Biofilms: recent advances in their study and control*, Harwood Academic Publishers, Amsterdam, Netherlands, pp. 333~360(2000).
7. Griebe, T., Chen, C. I., Stinivasan, R., “Analysis of biofilm disinfection by monochloramine and free chlorine,” *Biofouling and biocorrosion in industrial water systems*, Lewis Publishers, U.S.A., pp. 151~162(1994).
8. Haas, C. N., Joffe, J., Anmangandla, U., Hornberger, J. C., Heath, M. S., Jacangelo, J., and Glicker, J., “Development and validation of radiational design methods of disinfection,” AWWA Research Foundation, Denver, Colo., (1995).
9. Kim, J., Cho, M., Oh, B., Choi, S., and Yoon, J., “Control of bacterial growth in water using synthesized inorganic disinfectant,” *Chemosphere*, **55**(5), 775~780(2004).
10. Landeen, L. K., Yahya, M. T., Gerba, C. P., “Efficacy of copper and silver ions and reduced levels of free chlorine in inactivation of *Legionella pneumophila*,” *Appl. Env. Microbiol.*, **55**, 3045~3050(1989).
11. LeChevallier, M. W., Lowry, C. D., Lee, R. G., “Disinfecting biofilms in a model distribution system,” *J. Am. Water Works Assoc.*, **82**, 87~95(1990).
12. Lin, Y. E., Vidic, R. D., Stout, J. E., Yu, V. L., “Individual and combined effects of copper and silver ions on inactivation of *Legionella pneumophila*,” *Water Res.*, **30**, 1905~1913(1996).
13. Lin, Y. E., Vidic, R. D., Stout, J. E., Yu, V. L., “*Legionella* in water distribution systems,” *J. Amer. Water Works Assoc.*, **90**, 112~121(1998).
14. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 19th edn, American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation. Washington DC, USA(1995).
15. Stewart, P. S., Rayner, J., Roe, F., and Rees, W. M., “Biofilm penetration and disinfection efficacy of alkaline hypochlorite and chlorosulfamates,” *J. Appl. Microbiol.*, **91**, 525~532(2001).
16. Van der Wende E., “Biocide action of chlorine on *Pseudomonas aeruginosa* biofilm,” Ph D. thesis. Department of Civil Engineering, Montana State University, Bozeman (1991).
17. Wright, J. B., “*Legionella* biofilmstheir implications, study and control,” *Biofilms: recent advances in their study and control*, Harwood Academic Publishers, Amsterdam, Netherlands, pp. 291~310(2000).

18. Yu, F. P. and McFeters, G. A., "Environmentally acceptable control of biofilms in the pulp and paper industry," *Biofilms: recent advances in their study and control*, Harwood Academic Publishers, Amsterdam, Netherlands, pp. 381~400(2000).
19. Chen, X. and Stewart, P. S., "Chlorine penetration into artificial biofilm is limited by a reaction diffusion interaction," *Environ. Sci. Technol.*, **30**(6), 2078~2083(1996).