

급수관내 염소 주입이 미생물의 증식과 부식에 미치는 영향

김태현 · 이윤진*[†] · 임승주**

· 건국대학교 환경공학과, *청주대학교 환경공학과, **아이오와 주립대학교, 토목, 건설, 환경공학부

The Influence of Chlorine Application on Corrosion and Bacterial Growth in Home Plumbing Systems

Tae Hyun Kim · Yoon-jin Lee*[†] · Seung Joo Lim**

Department of Environmental Engineering · Konkuk University

*Department of Environmental Engineering · Cheongju University

**Department of Civil, Construction & Environmental Engineering · Iowa State University

(Received August 10, 2006/Accepted October 19, 2006)

ABSTRACT

This research was conducted using a model home plumbing system composed of copper, stainless steel, galvanized iron, carbon steel, and PVC (polyvinyl chloride) pipe. The number of bacteria present in stainless steel pipe and PVC was higher than other pipes. High turbidity and zinc release were found in galvanized iron pipe material and detected during the first 6 months. Conversely, there was a decrease in turbidity and zinc release after 6 months resulting in levels similar to other pipes. Copper concentration decreased as operation times increased. In this experiment, the number of bacteria detected in biofilm for a copper pipe continued to increase. Pipe material influenced bacterial numbers in biofilm and water. This showed that elevated chlorine could not control bacterial growth in biofilm for galvanized iron and stainless steel systems. It also suggested that the dosing of chlorine might not be available for all kinds of pipes. Therefore, another complementary method should be introduced to manage biofilm effectively in water distribution systems.

Keywords: chlorine, biofilm, HPC, bacterial regrowth

I. 서 론

수도수의 공급 중 배급수관망에서 미생물이 급격하게 성장하는 현상을 미생물의 재성장 혹은 후성장 현상이라고 부른다. 보다 엄밀히 두 현상을 구분하여 정의하면 소독제의 투입으로 손상을 받은 후 미생물이 회복되어 증식하는 현상을 재성장이라 하며 관망내에서 미생물이 자체 증식하는 현상을 후성장이라 말한다.¹⁾

수계에 생존하는 미생물은 부유미생물과 부착 미생물로 분류할 수 있고 그 중 먹는 물과 같은 반영양조건에서는 90% 이상이 생물막의 형태임이 보고되었다.²⁾ 이러한 생물막의 형성에 영향을 미치는 요소는 세균의 종류, 잔류소독제의 농도, 수온, 관의 재질, 전단력 등이 있다.^{3,5)}

상수도관망의 적절한 관리를 위해서는 물리, 화학적인 반응에 의한 관망의 부식을 고찰하는 것 뿐 아니라 부식 반응에 관여하는 미생물학적인 고찰이 반드시 요구된다. 미생물의 재성장문제는 배급수관망의 관리 비용을 증가시키고 심미적, 위생상의 문제점을 도출하고 있다.⁶⁾ 이를 제어하기 위해 가장 많이 이용되는 방법은 염소 등의 소독제를 투입하는 방법이 있으며 그 외에 미생물의 성장에 관계하는 관망내 영양물질을 관리하는 방법, 관내부를 세정하는 방법 등이 제시되고 있다. 그러나 배급수관망에서는 염소의 농도를 0.2 mg/l 이상으로 유지하였음에도 불구하고 때때로 미생물의 농도가 허용치 이상 증가하는 현상이 발견되고 있다.⁶⁾ 따라서 관망에서의 미생물학적인 안전성을 위해 투입하는 가장 보편적으로 이용되는 잔류염소의 주입법의 효용 및 관내부식에 미치는 영향에 대한 연구가 요구된다. 또한, 염소처리로 인해 부식성 증가에 대한 검토가 요구되는 실정이다. 상수도 배급수시설의 부식은 수돗물 중 적수, 탁수, 침전물질 그리고 맛·냄새의 발생 등을

[†]Corresponding author : Department of Environmental Engineering · Cheongju University
Tel: 82-43-229-8571 Fax: 82-43-229-8571
E-mail: yjlee@cju.ac.kr

발생시키며 인체에 유해한 중금속이 용출될 수 있으며, 관 재질의 손상으로 인한 누수 현상 등 위생적 측면에서도 큰 영향을 초래하게 된다.^{7,9)}

본 연구에서는 관내 부유 및 부착 미생물의 농도를 제어하기 위한 방법으로서 염소를 투입하는 방법을 검토하고 염소의 농도에 따른 미생물의 감소와 부식과의 관계에 대해 파악하였다. 또한 염소 투입으로 인한 수질의 영향과 관재와의 관계에 대해서도 검토하였다. 이를 위해 현재 급수관으로 이용되고 있는 탄소강관, 동관, 아연도강관, 스테인레스 스틸관을 이용하였으며 잔류염소의 농도가 평균 0.2~0.5 mg/l의 범위의 수도수 및 수도수에 염소를 추가로 1, 3 mg/l 투입한 경우에서 미생물막의 성장 및 유출수의 미생물학적 수질변화에 대해 고찰하였다.

II. 연구 재료 및 방법

1. 시료

본 연구에서는 급수관에서 유리염소에 의한 관재별 부식거동 및 미생물의 재성장에 대한 영향을 고찰하기 위해 수행되었으며 온도에 대한 영향을 배제하기 위해 시료를 20°C의 온도로 조정하여 실험에 이용하였다. 서울시에 위치한 K 대학교내 수도수를 사용 전 약 2-3분간 배출시킨 후 시료수로 이용하였다. 연구에 이용된 수도수의 특성을 Table 1에서 제시하였다. 연구기간 중 수도수 중의 잔류염소는 실험기간 중 0.2-0.5 mg/l 범위에서 검출되었으며 탁도는 0.5 NTU 이하로 낮게 검출되었다.

2. 실험방법

본 실험에서 현재 급수관으로 이용되고 있는 탄소강관, 동관, 아연도강관, 스테인레스 스틸관을 이용하였으며 두께와 직경은 Table 2와 같다. 각 관종들을 30 cm 길이로 절단하여 그 내부에 수도수를 가득 채운 후 고무마개를 이용하여 각 관종의 양 입구를 막고 이후

Table 1. Characteristics of feed water quality

Parameters	Tap water
HPC (CFU/ml)*	<100
Free residual chlorine (mg as Cl ₂ /L)	0.2-0.5
pH	6.9-7.5
Alkalinity (mg as CaCO ₃ /L)	30-40
TOC (mg as C/L)	1.2-1.8
Turbidity (NTU)	<0.5

*HPC (Heterotrophic Plate Count)

Table 2. Characteristics of pipe materials

Material	KS* number	External diameter (mm)	Thickness (mm)
Copper	5301	22.22	1.65
Carbon steel	3507	21.70	2.65
Galvanized iron	3507	21.70	2.80
Stainless steel	3576	21.70	2.80

*KS: Korean Standards

Source : <http://www.ks.or.kr>, March (2006).

파라필름으로 그 외부를 봉하여 부식현상의 대기에 의한 영향을 최소화하였다. 본 연구에서는 온도를 20°C로 일정하게 유지할 수 있는 인큐베이터를 이용하여 온도를 조정하였으며 관내의 시수는 3.5일을 채류시킨 후 교체하였다. 부착 미생물을 분석하기 위해서는 동일한 재료의 시편을 이용하였으며 그 특성을 Table 2에서 제시하였다. 각 관종을 스테인레스 스틸 재질의 절단기로 1 cm의 크기로 잘라 표면을 연마한 후 초음파 세척기를 이용하여 외부를 세척하였다. 이와 같이 준비된 시편을 슬리브에 넣은 후 시수로 채워 고무마개를 이용하여 물이 새지 않도록 고정시킨 후 각 실험조건에 맞는 항온장치에서 위치시켰으며 3.5일 경과 후 시수를 교체해 주었다. 반응시간에 도달하면 시료를 채취하여 중금속의 농도와 pH, 알칼리도, TDS, DO, 알칼리도, 잔류염소 등의 수질항목을 분석하였다. 시료중의 Cu, Pb, Zn, Fe 등의 중금속은 ICP(Inductively Coupled Plasma Spectroscopy, Labtam 8440)를 이용하여 측정하였다.

3. 분석 방법

1) 일반 세균의 측정

중속영양세균은 R2A 배지를 이용하여 분석하였으며 121°C, 15분 동안 멸균하여 미리 제조된 배지에 자동 피펫을 이용하여 시료를 접종하였고 유리 도말봉을 사용하여 준비된 배지에 도말하였다. 20°C 인큐베이터에서 도말한 배지를 배양하였으며 7일 후 30~300개 범위의 배지를 선택하여 콜로니를 계수하였으며 CFU (Colony Forming Unit)/m²로 표기하였다.¹⁰⁾

2) 부착 미생물

부착 미생물의 분석을 위해 노출시간에 도달한 시편을 꺼내어 그 내부를 멸균된 면봉(Fisher Scientific)을 사용하여 미생물막을 제거하였다. 멸균 증류수 5 ml를 시험관에 담아 면봉과 증류수와 접촉하게 한 후 볼텍스 믹서(KMC-1300)를 이용하여 혼합시켰으며 이와 같

은 동작을 한번 더 실시하였다. 이같은 과정을 통해 준비된 시료를 R2A 배지에 접종하여 HPC(CFU/cm²)를 분석하였다. ATP(Adenosine triphosphate)는 ATP 측정기(AMSA light-III)를 이용하여 분석하였다.

3) 부식 속도

부식 속도는 시편을 이용한 무게 감량법으로 측정하였다. 시편의 초기 무게와 표면적을 측정한 후 일정 노출시간이 경과 후 슬러브에서 시편을 분리시켰다. 멸균된 면봉을 이용하여 부식생성물을 제거하였고, 초음파

세척기에서 20°C, 30분의 조건에서 세척하여 이물질에 대한 영향을 제거하였다. 이를 3차 증류수로 3회 세척한 후에 건조하여 무게를 측정하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 유출수중의 일반세균의 분포

Fig. 1에서 탄소강관, 동관, 아연도강관, 스테인레스 스틸관, PVC에서 염소의 농도에 따른 관내 유출수에서

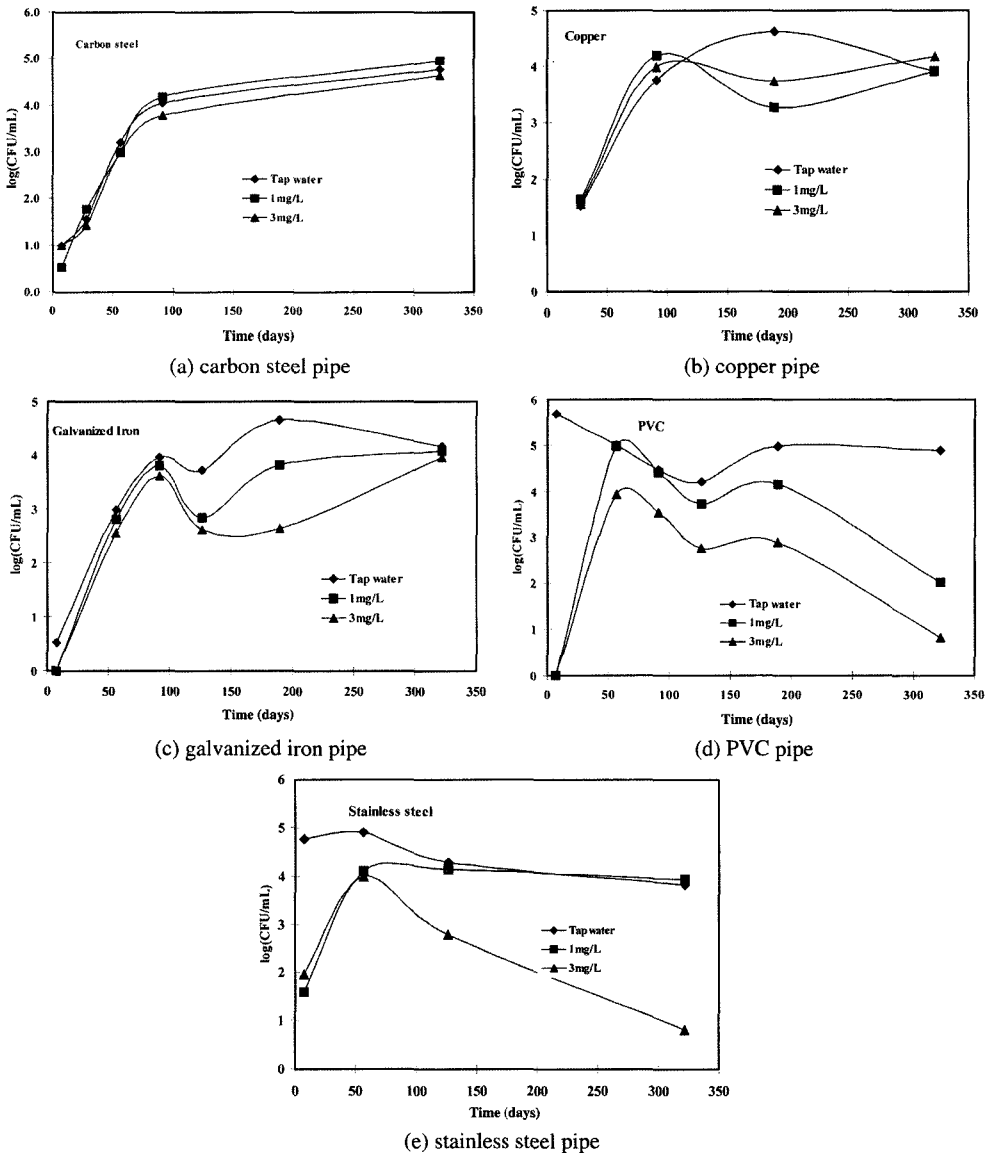


Fig. 1. Effect of free chlorine for suspended HPC.

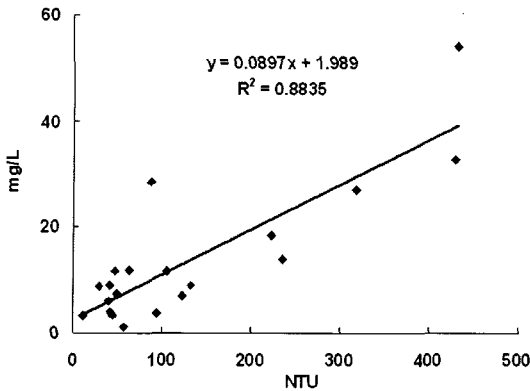


Fig. 2. Relationship between Fe release concentration and turbidity in carbon steel pipe.

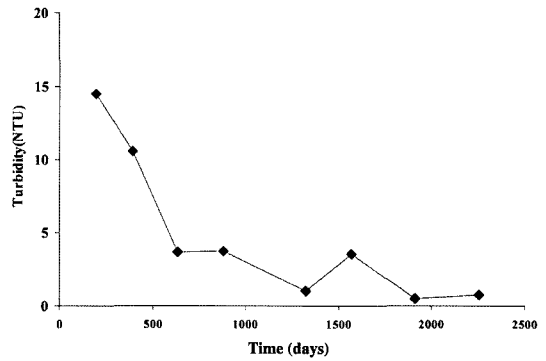


Fig. 3. Variation of turbidity in galvanized iron pipe.

미생물의 증식을 제시하였다. 시간경과에 따라 미생물의 농도는 증가하였으나 100일 이후에는 그 이전 접촉 시간에 비해 증식율이 비교적 감소하였다. 탄소강관의 경우 관내 주입한 염소농도에 따른 명확한 경향을 나타내지 않았으나 잔류 염소가 약 0.2 mg/l인 수도수에 비해 3 mg/l의 염소를 추가로 투입한 경우 유출수중의 미생물의 수가 수도수에 비해 감소되었다. 탄소강관에서는 실험기간 중 탁도가 고농도로 용출되었으며 이때 Fe의 용출농도도 먹는 물 기준 농도인 0.3 mg/l 이상이 검출되었다. 탄소강관에서 Fe의 용출농도와 탁도와는 Fig. 2에서와 같은 상관관계를 나타냈으며 탁도가 Fe 용출농도의 간접 지표로도 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

동관의 경우 잔류염소의 농도를 높게 주입한 경우에도 미생물의 증식 제어에 있어 명확한 경향을 나타내지 않았다. 동관의 경우 초기 미생물수는 배출되는 구리의 독성에 의해 초기 200일까지 감소하였으나 그 이후에는 점차 증가하였다고 보고된 바 있다.¹¹⁾ 그러나 본 실험에서 시험기간 중 유출수중의 구리농도는 1.2~2.4 mg/l로 높게 배출되었음에도 불구하고 유출수중의 일반세균은 시간경과에 따라 점차 증가하였다.

아연도강관에서는 염소농도의 증가에 따라 미생물의 감소가 이루어졌으나 운전 300일 이후에는 큰 변화가 없었다. 운전 100일 이후에는 일반세균의 증가율이 비교적 감소하였다. 아연도강관에서 운전 초기 Zn이 7.78 mg/l 농도까지 배출되고 탁수가 배출되었으나 이후 200일 이후 Zn 농도의 감소로 인해 이같은 문제는 해소되었다. 표면의 아연도금이 벗겨진 후 철의 용출이 예상되었으나 이로 인한 문제는 실험기간 중 나타내지 않았다. 실험 초기에 아연도강관에서는 Fig. 3과 같이 탁도가 높게 검출되었는데 196일에는 15 NTU의 탁도가

검출되었으며 6개월 이후에는 탁도 배출문제가 해소되었다. 따라서, 강관의 매설시 초기 탁도의 유발이 예상되며 탁도와 중금속의 용출과의 상관관계를 가지고 있음을 알 수 있다.

스테인레스 스틸 및 PVC관중에 수도수를 이용할 경우 타관중에 비해 유출수중에 높은 일반세균의 수를 나타냈다. 그러나 염소의 농도의 증가에 따라 미생물의 제어가 용이하게 이루어졌다. 스테인레스 스틸 관에서는 수도수에 염소 1 mg/l의 추가 주입시 수도수와 큰 차이를 보이지 않았으나, 3 mg/l 주입시에는 최대 9.7×10^3 까지 증가했던 유출수중의 세균이 운전 300일 이후에는 거의 존재하지 않았다. 수도수와 염소 1 mg/l의 경우에는 120일 이후에는 steady state 상태에 도달하였다. 본 연구에도 PVC 관중 중에 일반세균 농도가 비교적 높게 검출되었다. 이같은 결과는 플라스틱관중에서 용출되는 인에 의해 미생물 재증식이 이루어진다고 보고되고 있다.¹¹⁾ 그러나 본 실험에서 PVC 관내 유출수중 인의 농도는 다른 금속관중에 비해 큰 차이를 보이지 않았다.

2. 관내 부착미생물의 거동

Fig. 4에서 탄소강관, 아연도강관, 동관, PVC, 스테인레스 스틸관에서의 수도수및 염소를 추가로 1, 3 mg/l를 주입하였을때 부착미생물의 성장 거동을 도시하였다. 탄소강관에서 초기 부착 미생물의 수는 다른 관중에 비해 높았으나 타 관중에서와 달리 접촉시간 90일 이후 미생물의 수는 점차 감소하였다. 270일 이후에는 염소농도를 증가시킨 조건에서 바이오 필름 형성이 감소되는 현상을 보였으나 그 차는 크지 않았다. 본 실험에서 탄소강관의 바이오필름 형성은 염소의 주입과 관련없이 반응기간 동안 안정된 성장을 보였으며 이는 Fig. 5에서와 같이 탄소강관의 표면 침적물에 의해 염

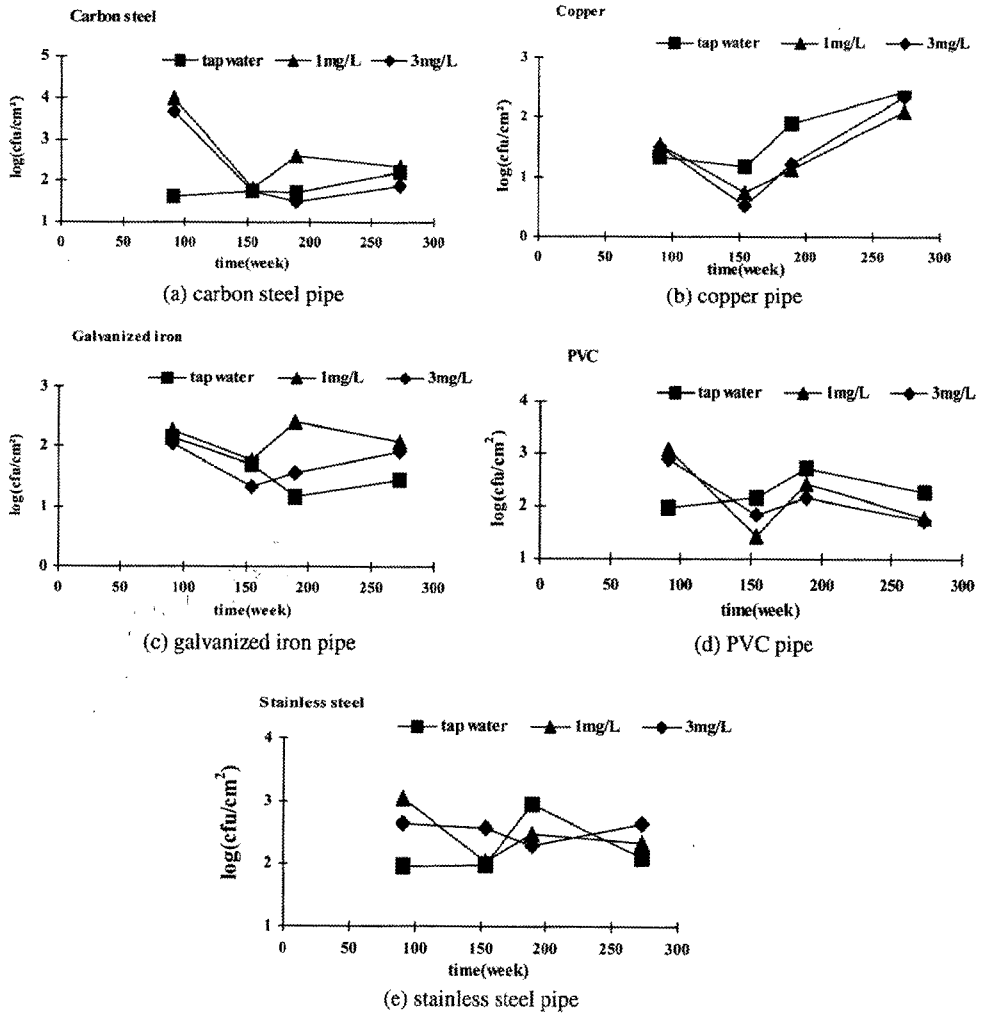


Fig. 4. Formation of biofilm on the pipe surfaces.

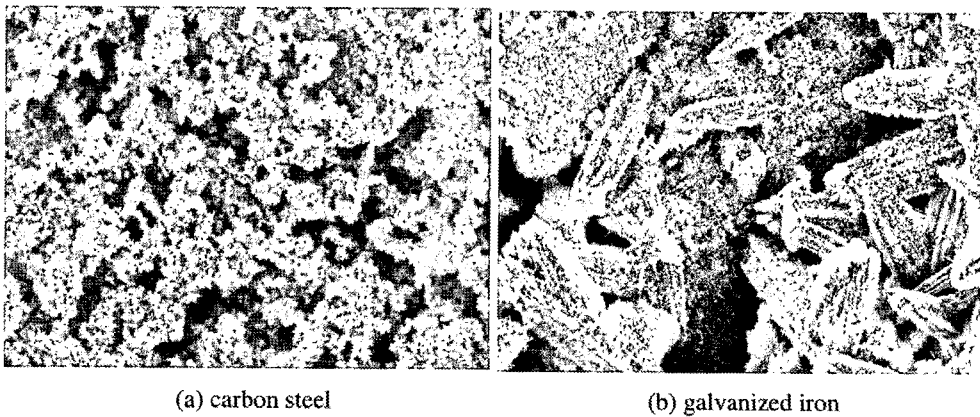


Fig. 5. Photographs of scanning electron microscopy for pipe coupons after chlorination.

소 소모량이 증가하는 것에 그 이유가 있는 것으로 생각되며 침적된 무기물 및 유기물에 의해 세균이 용이하게 부착성장한 것으로 생각되며 복잡한 층상구조가 관찰되었다.

동관에서는 유리염소를 투입하였음에도 불구하고 270일까지 바이오필름의 형성이 지속적으로 증가하는 현상을 보였다. 염소를 주입한 경우에 수도수에서 바이오필름의 형성율보다 다소 낮았으나 1 mg/l를 주입한 경우와 3 mg/l을 주입한 경우에서 바이오필름의 성장에 큰 차이는 없었다.

아연도강관 및 스테인레스강관에서는 염소의 농도를 높게 투입한 경우에도 바이오필름의 제어에는 큰 영향을 주지 않았다. Fig. 5에서 아연도강관의 표면에서 관표면에 매끄럽지 않은 면과 침전물이 발견되었으며 탄소강관에서처럼 관표면의 조도는 바이오필름의 부착성장 및 관내 수질의 위생학적인 면과 관련되는 것으로 보여진다. 아연도강관 및 스테인레스강관에서의 바이오필름은 초기 90일 이내에 형성되었고 이후 운전시간에서 염소농도와 관계없이 안정된 형성율을 보였다. 스테인레스강관, PVC관에서 바이오필름의 형성율은 타 관종에 비해 높았다. 최근에 위생학적인 면을 고려하여 급수관종을 스테인레스 강관 등으로 교환하고 있으며 최근에 플라스틱관의 이용도 증가하고 있는 추세이다. 따라서, 부식문제 및 수명 등 뿐 아니라 관내 미생물의 재성장 및 부착 미생물의 생성 등의 문제에 관한 검토가 이루어져야 할 것으로 생각된다. 스테인레스강관의 표면에서는 여러 균열된 틈이 관찰되었고 그 사이로 미생물의 성장이 발견되었다. 그러나, 미생물의 부착에 있어 스테인레스관에서 표면의 조도($0.01 \mu\text{m} < Ra < 0.9 \mu\text{m}$)에 영향을 받지 않았다는 연구결과¹²⁾도 있다. PVC관의 경우에는 이미 보고된 바와 같이¹¹⁾ 동관에 비해 높은 바이오필름의 형성을 보였으나 염소의 추가 투입으로 바이오필름의 제어가 효과적으로 이루어졌다.

따라서, 일반세균에 의한 부착 미생물을 평가한 결

과, 대부분의 관종에서 염소의 주입으로 인해 부착미생물은 감소되었으나 관종에 따라서는 염소의 추가주입에도 불구하고 이와 관계없이 부착미생물이 성장이 양호하게 이루어지는 것이 발견되었으며 이는 염소에 의한 관내 부착미생물의 제어가 절대적이지 않았으며 관내 미생물의 재성장 제어에 대한 대안의 도입이 요구된다. 또한 본 연구결과, 대부분의 관종에서 이미 생성된 부착미생물에 대해 염소의 투입시 크게 감소되지 않았으며 이같은 결과는 이미 관망내에 형성되어있는 부착미생물학적인 제어를 위해 염소의 투입만으로는 곤란함을 나타낸다. 부착세균들은 부유세균보다 염소에 대해 약 150~3,000배의 저항력을 가진 것으로 보고되고 있다.¹³⁾

270일 이후 생존 미생물을 대표하는 ATP의 결과도 일반세균의 결과와 유사하게 나타났다. 동관과 PVC관에서 염소를 추가로 투입한 경우 ATP가 감소하였으며 주입염소의 농도가 증가할수록 ATP가 감소하였다. 아연도강관의 경우 일반세균의 결과와는 상이하게 염소농도에 따라 ATP가 감소하는 현상을 보였다. 반면, 탄소강관에서는 부착세균의 결과와 유사한 결과를 보였는데 염소의 추가 주입시에도 ATP는 증가하였다. 탄소강관을 제외한 모든 관종에서 염소의 추가 투입에 의해 ATP는 감소하는 경향을 보여 염소의 주입방법에 따라 부착미생물의 활동도 제어에 있어 유효하였다. 따라서 관종에 따라 배급수관망의 미생물막제어를 위해 재염소투입의 유효성이 상이하며 투입시 이에 대한 고려가 이루어져야 할 것으로 생각된다. 이같은 결과는 ATP를 이용해 측정된 미생물의 활동도는 유리염소에 의해 저해받았지만 명확한 상관관계를 발견되지 않았고 관재질은 미생물막의 성장률에 영향을 미친다는 Hallam 등의 연구결과와 유사하였다.⁵⁾ 본 연구에서는 ATP는 일반세균의 결과와 상당한 유사한 경향을 도출해 냈으며 관내 부착미생물의 거동을 평가하기에 유용한 지표로 이용될 수 있으리라 판단된다.

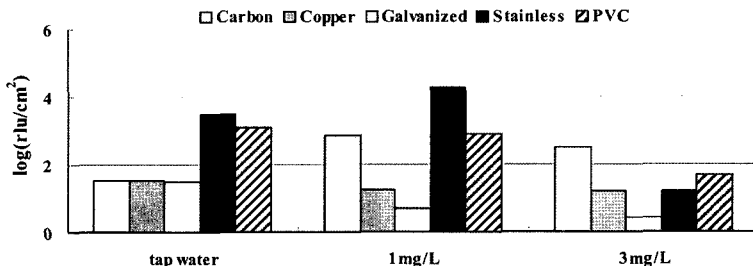


Fig. 6. Concentration of ATP in biofilm from pipes.

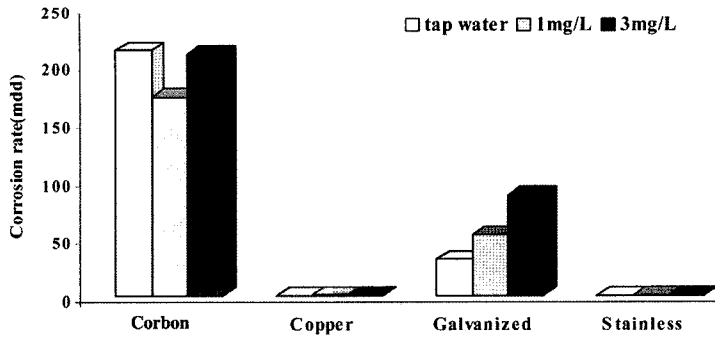


Fig. 7. Corrosion rate depending on chlorine dosing.

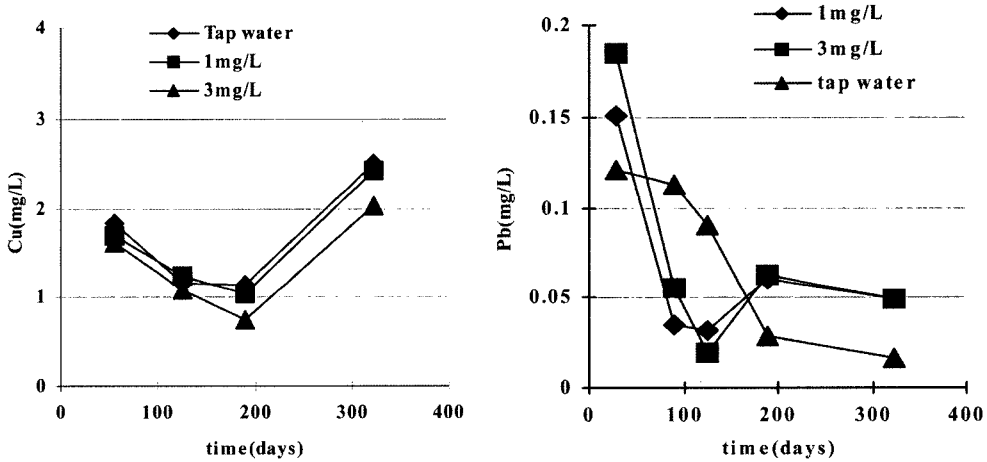


Fig. 8. Concentration of copper and lead in outlet water of copper pipes.

3. 유리 염소에 의한 부식 영향

Fig. 7에서 수도수와 염소 1, 3 mg/l을 주입하였을 때 관중별 부식도를 제시하였다. 탄소강관, 아연도강관순으로 부식도가 높았으며 동관과 스테인레스 스틸관에서는 부식도가 매우 낮아 무게 감량법으로 거의 검출되지 않았다. 아연도강관에서는 염소 1, 3 mg/l 추가 주입시 부식도는 수도수의 1.7, 2.7배 증가하였다. 탄소강관에서는 수도수, 1, 3 mg/l에서 각각 212, 171, 209 mdd로 염소농도에 따른 경향을 나타내지 않았다.

동관의 부식도는 실험기간 중 매우 낮았고 배출되는 Cu의 배출농도를 측정된 결과는 Fig. 8과 같다. 동관에서의 Cu의 농도는 초기부터 190일까지 감소하다가 이후 다시 증가하였다. 관내 염소의 농도의 증가에 따라 구리의 배출농도는 감소하였다. 본 실험에서는 접촉시간 190일 이전에 Cu의 농도가 높게 증가했지만 바이오필름의 형성은 양호하게 이루어졌으며 기존의 보고와 달리 미생물의 수는 감소하지 않았다. 동관의 부식은

잔류 염소의 농도에 영향을 받지 않으며 잔류염소가 동관의 부식에 영향을 미치는 것은 pH 변화에 민감하게 반응한 결과라는 보고도 있다. 동관에서 염소주입농도에 따라 배출되는 pb의 농도는 염소를 추가로 주입한 경우 시간경과에 따라 점차 감소하다가, 126일 이후 다소 증가하였으며 수도수의 경우 운전시간이 증가할수록 납의 농도가 감소하였다. 320일 이후 1, 3 mg/l의 염소를 주입한 경우 및 수도수의 경우 각각 0.05, 0.05, 0.02 mg/l로 낮은 값을 나타냈다.

Fig. 9에서 아연도강관에서의 수도수와 염소농도의 증가에 따른 Zn의 용출을 제시하였다. 초기 28일의 반응 후 수도수, 1, 3 mg/l의 경우에 Zn은 각각 6.05, 8.17, 18.1 mg/l 용출되어 염소농도가 높을 수록 용출 농도가 높았다. 190일까지 증가된 Zn에 의해 아연도강관에서의 탁도가 유출하였으나 320일에서 Zn의 농도는 감소하였고 수도수, 1, 3 mg/l에서 0.86, 1.45, 1.91 mg/l로 감소하였다.

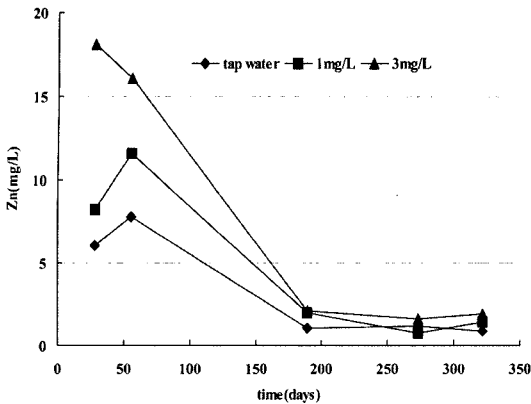


Fig. 9. Concentration of Zn in outlet water of galvanized iron pipes.

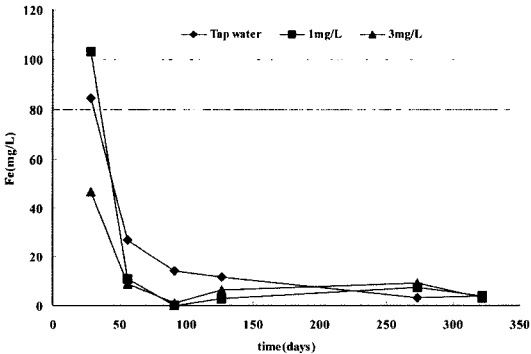


Fig. 10. Concentration of Fe in outlet water of carbon steel pipes.

Fig. 10에서 탄소강관에서의 용출되는 Fe의 농도를 도시하였다. 탄소강관에서의 Fe의 농도는 50일 이후 초기의 32, 11, 19%로 감소하였다. 시간의 감소에 따라 Fe의 농도는 감소하였으며 320일 이후에 Fe의 농도는 수도수, 1, 3 mg/l에서 각각 3.7, 3.8, 3.1 mg/l 용출되었다.

IV. 결 론

본 연구에서는 탄소강관, 아연도강관, 동관, 스테인레스 스틸관, PVC 관을 통해 급수관내 유리 염소에 의한 급수관망에서의 부식 거동과 미생물의 성장제어에 대해 파악하였다. 연구로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

탄소강관 및 아연도강관에서 높은 초기 탁도가 검출되었으며 탁도는 운전기간의 경과에 따라 점차 감소하였다. 탁도와 용출 중금속의 농도는 상관관계를 나타냈

다. 탄소강관 및 아연도강관에서 중금속의 용출 후 관재 표면에 매끄럽지 않은 강관의 표면사이로 층상구조의 잔류물 및 부착미생물이 관찰되었다. 아연도강관은 염소의 주입농도에 따라 부식도가 증가하였으며 그 외 타관종에서는 염소농도 증가에 따른 부식속도의 증가는 관찰되지 않았다.

관재질에 따라 부유 및 부착미생물의 성장은 상이하였으며 염소의 투입만으로 이미 관망내에 형성되어 있는 부착미생물의 성장을 제어하기 어려웠다. 특히 스테인레스 스틸관과 PVC에서의 부유 및 부착미생물이 타관종에 비해 높았으나 부유미생물에 대해 염소농도 증가에 따라 제어가 용이하게 이루어졌다. 아연도강관 및 스테인레스 스틸관에서 바이오피름의 형성은 주입된 염소의 농도와 관련없이 안정적으로 형성되었다.

감사의 글

이 논문은 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 “유망 여성과학자 경쟁력 강화지원사업(R03)”에 의해 지원을 받아 수행된 연구이며 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. LeChevallier, M. W., Babcock, T. S. and Lee, R. G. : Examination and characterization of distribution system biofilms. *Applied and Environmental Microbiology*, **53**(12), 2714-2724, 1987.
2. Keinänen, M. M., Korhonen, L. K., Lehtola, M. J., Miettinen, I. T., Martikainen, P. J., Vartiainen, T. and Suutari, M. H. : The microbial community structure of drinking water biofilms can be affected by phosphorus availability. *Applied and Environmental Microbiology*, **68**(1), 434-439, 2002.
3. 박성주 : 상수도 배급수계통에서 세균 재성장 및 생물막 형성에 관한 연구. 서울대학교 박사학위논문, 1993.
4. Ollos, P. J. : Effects of drinking water biodegradability and disinfectant residual on bacterial regrowth, Doctoral Thesis, University of Waterloo, Canada, 1998.
5. Hallam, N. B., West, J. R., Foster, C. F. and Simms, J. : The potential for biofilm growth in water distribution system. *Water Research*, **35**(17), 4063-4071, 2001.
6. 윤태호, 이윤진, 이옥재, 이의광, 김현, 이동찬, 남상호 : 수도물 배급수계통의 유리잔류염소의 농도에 따른 중속영양세균의 거동에 관한 연구. *한국환경보전학회지*, **28**(3), 9-18, 2002.
7. 팽필재, 이현동, 남상호, 정원식 : 국내수계별 수도물의 부식성 및 금속용출특성평가에 관한 연구. *대한환경공학회지*, **23**(7), 1195-1203, 2001.

8. Servais, P., Laurent, P. and Randon, G. : Comparison of the bacterial dynamics in various french distribution system. *Journal of Water Supply : Research and Technology-Aqua*, **44**(1), 10-17, 1995.
9. 이윤진, 남상호 : 방청제를 이용한 상수도 배급수시설의 부식방지에 관한 연구. *한국환경보건학회지*, **29**(3), 65-71, 2003.
10. American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environment Federation : Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, American Public Health Association, Washington, 1995.
11. Lehtola, M. J., Ilkka, T., Miettinen, I. T., Keinanen, M. M., Kekki, T. K., Laine, O., Hirvonen, A., Vartiainen, T. and Martikainen, P. J. : Microbiology, chemistry and biofilm development in a pilot drinking water distribution system with copper and plastic pipes. *Water Research*, **38**, 3769-3779, 2004.
12. Hilbert, L. R., Bagge-Ravn, D., Kold, J. and Gram, L. : Influence surface roughness of stainless steel on microbial adhesion and corrosion resistance. *International Biodeterioration and Biodegradation*, **52**, 175-185, 2003.
13. 조재창, 박성주, 김상종 : 생물막 세균의 염소소독제에 대한 내성. *미생물학회지*, **31**, 255-260, 1993.