

동관에서 pH, 알칼리도, 염소이온이 부식에 미치는 영향

조관형[†] · 김선일* · 우달식**

청운대학교 건설토목환경공학과, *한국화학시험연구원, **(재)한국계면공학연구소

Effects of pH, Alkalinity, Chloride Ion on the Copper Pipe Corrosion

Kwan-Hyung Jo[†] · Sun-Il Kim* · Dal-Sik Woo**

Department of Civil & Environmental Engineering, Chungwoon University, Hongsung, Korea

*Korea Testing and Research for Chemical Industry, Seoul, Korea

**Korea Interfacial Science and Engineering Institute, Seoul, Korea

(Received October 20, 2006/Accepted February 6, 2007)

ABSTRACT

This study investigated the effects of pH, alkalinity, and chlorine ion which are important water quality impact factors to the corrosion in the simulated distribution system where the copper pipe is affixed. The result shows that pitting index was increased as the alkalinity and chloride ion increase in the distilled water, but there was no relation to pH. Actually the uniform corrosion rate was decreased as the pH increase with the laboratory tap water. In conclusion, it is necessary to control the pH which stands above minimum 7.5 to prevent pitting corrosion in the copper pipe. Consequently, comprehensive research about the effect of lime soda ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) which was used as a coagulation additive in the water treatment plant to pipe corrosion must be accomplished additionally.

Keywords: pitting corrosion, pitting index, alkalinity, chloride ion, distribution system

I. 서 론

정수처리장에서 완벽히 처리된 수도물이 배급수계통을 거치는 과정에서 상수도관의 부식, 미생물의 재성장 등의 문제가 발생할 경우 안전한 수도물을 공급할 수 없게 된다.^{1,2)} 따라서 양질의 수도물을 공급하기 위해서는 철저한 원수관리, 막여과를 포함한 고도정수처리의 도입뿐만 아니라 정수지를 떠나 가정의 수도꼭지까지의 공급과정의 유지관리가 매우 중요하다. 특히 수도물 공급과정 중에서도 옥내급수관의 부식은 적수로 인한 수질저하로 소비자의 건강과 심미적인 문제를 야기 시키거나 부식생성물의 관내축적에 의한 통수량 저하로 관의 보수와 교체에 따른 경제적인 문제를 야기시킨다. 부식의 발생은 주로 관의 재질, 스케일이나 산화막의 형성 및 수리학적 조건 등에 의해 영향^{3,6)}을 받는데, 2005년 12월 수도법의 개정에 따라

일정규모 이상의 건축물 또는 시설의 소유자나 관리자는 준공검사 후 5년이 경과한 날부터 1년 주기로 옥내급수관의 상태에 대하여 탁도, 수소이온농도, 색도 또는 철에 대한 검사를 실시하고 검사기준을 초과하는 경우 옥내급수관의 세척 등을 실시해야만 함에 따라 옥내급수관의 유지관리에 대한 관심이 급증하고 있다.

현재 국내외의 옥내급수관으로 많이 사용되는 관종은 동관, 스테인리스강관 등이 있으며, 이들 관종 중에서 본 연구에서 채택한 동관은 현재 국내외에서 보편적으로 사용^{6,7)}되고 있고, 특히 1994년 옥내급수관으로 대부분 이용되었던 아연도강관의 사용이 금지된 이후 동관의 사용량은 급증하여, 서울시의 2005년 조사⁷⁾에 따르면 아파트에서 사용되는 동관이 58.6%로 가장 많이 사용되고 있는 것으로 조사되어 동관에서의 부식 영향인자 고찰은 매우 필요하다고 생각되나, 그동안 이에 대한 연구는 매우 미흡한 상태에 있다.

동관의 부식은 육안으로 확인하였을 때 균일부식(uniform corrosion)과 국부부식(localized corrosion)으로 나눌 수 있다. 동관에서의 국부부식은 부식이 일어

[†]Corresponding author : Department of Civil & Environmental Engineering, Chungwoon University
Tel: 82-41-630-3287, Fax: 82-41-630-3287
E-mail : jokwan@chungwoon.ac.kr

나는 수질과 동관표면에 존재하는 산화막이나 스케일 혹은 외부적 피로가 존재하는 지점이 있을 경우 갈바닉 부식(galvanic corrosion), 침식(erosion corrosion), 틈부식(crevice corrosion), 공식(pitting corrosion) 등의 형태로 구분되는데, 동관에서는 주로 공식(pitting corrosion)의 형태로 나타난다.^{8,9)}

동관의 부식속도와 부식부산물의 용출을 억제하기 위해서는 정수장에서 인산염계 방청제를 사용¹⁰⁾하거나 또는 알칼리제 주입에 의한 pH와 알칼리도의 조절이 필요한데, 동관의 부식에 있어서 pH와 알칼리도가 미치는 영향을 완벽히 평가하지 않은 상태에서의 pH와 알칼리도의 조절은 오히려 부식을 촉진할 수 있다. 또한 동관에서 염소이온은 부식의 촉진인자로 작용하는 것으로 알려져 있어 pH, 알칼리도와 함께 동관에서 관부식에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 연구가 매우 필요하다.

따라서 본 연구에서는 옥내 급수관으로 많이 사용되고 있는 동관을 대상으로 모의급수관망을 구성하여 주요 수질영향인자인 pH, 알칼리도, 염소이온이 동관의 부식속도에 미치는 영향을 고찰하였다.

II. 실험재료 및 방법

본 연구에서 이용된 모의 급수관 실험장치의 개략도는 Fig. 1과 같다.

실험장치는 시편관(test piece sleeve)과 저류조로 구성되었다. 시편관은 직경 20 mm의 동관 시편(test piece)이 설치될 수 있도록 직경 30 mm, 길이 300 mm의 아크릴 원통관으로 상하부가 분리되도록 제작하였다. 인공시료를 저장하는 저류조는 유효용량 20 l이

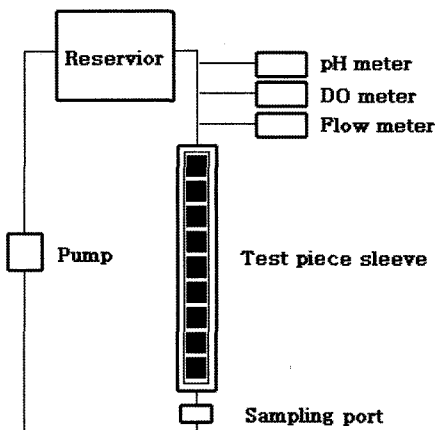


Fig. 1. Schematic diagram of pipe loop system.

며, pH 측정기, DO 측정기, 유량계를 연결하였으며 유속은 1.0 m/sec로 조절하였다.

본 연구에서 pH와 알칼리도에 따른 부식속도 실험에 사용한 대상원수는 3차 증류수를 사용하였고, 0.1 M NaOH와 0.1 M CH_3COOH 에 의해 pH 7, 8, 9로 조절하였으며, 알칼리도는 0.1 M NaHCO_3 에 의해 10, 50, 100, 150 mg CaCO_3 /l로 조절하였다.

염소이온의 농도에 따른 부식속도 실험에 이용한 대상원수는 0.1 M NaCl을 이용하여 농도를 10, 25, 50, 100, 150 mg/l로 맞추었다.

pH, 알칼리도, 염소이온의 상호작용에 따른 부식속도 실험에 사용한 대상원수는 염소이온의 농도를 25, 50 mg/l, pH는 7, 8로 조절하였고 알칼리도는 10, 50, 100, 150 mg CaCO_3 /l로 조절하였다. 염소이온의 농도는 0.1 M NaCl로 조절하였으며, pH는 0.1 M NaOH와 0.1 M CH_3COOH 로, 알칼리도는 0.1 M NaHCO_3 로 조절하였다. 염소이온의 농도를 25, 50 mg/l로 고정시킨 후 pH와 알칼리도를 행렬(matrix) 형태로 대상원수의 수질을 변화시켰다. 이온강도는 0.01 M NaClO_4 로 일정하게 조절하였다.

수돗물에 대한 부식속도 실험에 이용한 대상원수는 실험실내 수돗물을 사용하였으며, pH 7.3, 알칼리도 49.3 mg CaCO_3 /l의 수돗물을 대조군(blank)으로 하였다. 수돗물의 알칼리도는 100, 150 mg CaCO_3 /l, pH는 7.5, 8, 9로 조절하였으며, pH는 0.1 M NaOH와 0.1 M CH_3COOH 로, 알칼리도는 0.1 M NaHCO_3 로 조절하였다. 이온강도는 0.01 M NaClO_4 로 일정하게 조절하였다.

모든 실험의 대상원수 수온은 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 유지하였으며, 대상원수를 모의 급수관망내에 넣고 5분 동안 운전한 후 Fig. 2와 같은 부식속도측정기(Corrator, Rohrbach Cossasco System Model RCS 9000)를 이용하여 부식속도를 측정하였다. 부식속도 측정기(corrator)는 시편시험(coupon test) 등과 비교하여 간단하고 경제적인데 시간에 따른 부식속도 변화를 측정하는 데는 매우 유용하게 활용되고 있으며, 금속표면에서 균일부식이 발생할 경우에는 아주 정확히 부식을 측정할 수 있다.

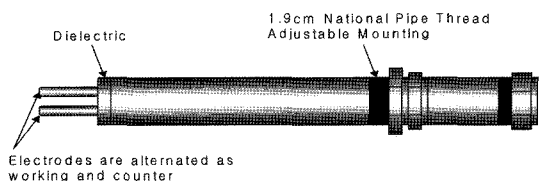


Fig. 2. Schematic diagram of corrator.

III. 결과 및 고찰

1. pH와 알칼리도에 의한 영향

본 연구에서는 증류수를 실험대상 원수로 하여 pH 7, 8, 9에서 알칼리도를 각각 10, 50, 100, 150 mgCaCO₃/l로 조절한 후 모의급수관망에 동관시편을 장착하고 대상원수를 순환시키면서 부식속도측정기로 동관의 균일부식속도를 측정하였으며, 그 결과를 Table 1에 나타내었다.

Table 1에 나타난 바와 같이 알칼리도의 관점에서 볼 때 pH 7, 8에서는 알칼리도가 증가할수록 부식속도가 증가하였으나, pH 9에서는 알칼리도와 관계없이 부식속도가 0.988 MPY로 일정하였다. 이러한 결과를 통해 동관에서는 pH 7, 8의 조건에서 알칼리도가 부식 촉진에 매우 큰 영향을 주며, pH 9 이상에서는 알칼리도가 부식에 영향을 거의 주지 않음을 확인할 수 있었다.

그러나 실제로 동관 내부에서는 균일부식과 함께 국부부식의 일종인 공식(pitting) 부식이 동시에 일어나고 있고, 동관을 재질로 하는 옥내급수관에서 많은 문제를 일으키는 것은 균일부식에 의한 영향도 있지만 대부분 공식에 의해서 일어나기 때문에 부식상태를 보다 정확히 판단하기 위해서는 공식 속도를 고려해야만 한다.

따라서 본 연구에서는 부식속도측정기(corrator)를 이용하여 공식 경향(pitting tendency)을 측정하여 Table 2에 나타내었다. 공식 경향은 단위가 없으며 값이 크면 공식이 발생할 수 있는 수질상태이며, 값이 작으면 공식 문제가 없는 수질상태를 나타낸다. 공식의 상대적인

Table 1. Corrosion rates with different pH and alkalinity in simulated distribution system

Parameter	Alkalinity (mgCaCO ₃ /l)			
	10	50	100	150
pH 7	1.021	1.029	1.045	1.125
pH 8	1.004	1.015	1.022	1.048
pH 9	0.988	0.987	0.988	0.988

*MPY: Miles Per Year (= 10⁻³ inches/year)

Table 2. Pitting tendency with different pH and alkalinity in simulated distribution system

Parameter	Alkalinity (mgCaCO ₃ /l)			
	10	50	100	150
pH 7	0.4	0.5	0.9	1.0
pH 8	0.2	1.4	1.7	1.9
pH 9	0.1	0.6	0.9	1.1

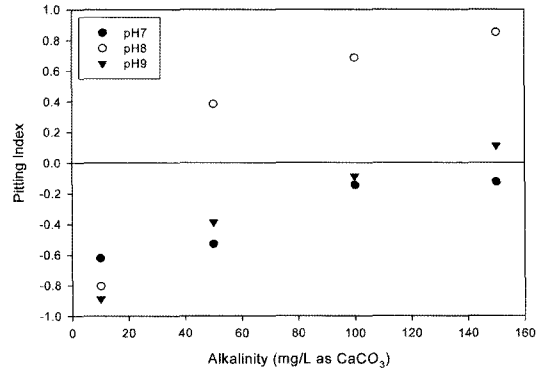


Fig. 3. Pitting index with different pH and alkalinity in simulated distribution system.

크기를 각 수질 조건별로 비교하기 위하여 Table 2의 공식 경향의 값을 Table 1의 부식속도 값에서 빼준 결과 값을 공식 지수(pitting index)라 표기하고, 이를 Fig. 3에 나타냈다.

Fig. 3에 나타난 값이 0보다 크면 수질에 의한 공식 문제가 발생할 수 있는 상태이며, 0보다 작으면 수질에 의한 공식 문제가 일어나지 않음을 의미한다. pH가 7일 때 알칼리도가 증가할수록 공식 지수(pitting index, PI)는 -0.621에서 -0.125로 증가되었다. 알칼리도가 증가할수록 PI가 0에 가까워지는데 이는 pH 7에서 알칼리도가 증가할수록 공식 경향이 상대적으로 증가한다고 말할 수 있다. 전반적으로 pH 7에서는 공식이 알칼리도 증가와 관계없이 크게 문제가 되지 않는다는 것을 알 수 있었다.

pH 8에서는 알칼리도가 증가할수록 PI는 -0.804에서 0.852로 크게 증가하였는데, pH 8에서는 알칼리도가 증가할수록 공식이 문제가 됨을 보여주고 있다. 알칼리도가 10 mgCaCO₃/l일 때는 PI가 모두 0보다 작기 때문에 공식 문제가 없지만 알칼리도가 증가할수록 PI가 0보다 큰 값을 가지게 되므로 공식 문제가 발생함을 알 수 있었다.

pH 9에서는 알칼리도가 증가할수록 PI가 증가하는 경향을 보이고 있지만, pH 7에서와 마찬가지로 공식 문제는 거의 발생하지 않는다고 볼 수 있다. 다만 알칼리도가 150 mgCaCO₃/l일 때 PI가 0.112이므로 상대적으로 적은 공식 문제가 발생됨을 알 수 있었다.

전체적으로 볼 때 일정한 pH에서 알칼리도가 증가할수록 공식 지수(PI)가 증가하는 경향을 나타내었다. 일반적으로 pH가 증가할수록 부식속도는 감소하는 경향을 보이지만¹¹⁾ 본 실험에서는 공식 지수(PI)가 pH 8, pH 9, pH 7의 순서로 pH 8일 때 가장 공식의 가능

성이 크고, pH 7일 때 공식의 가능성이 가장 낮게 나타나 일반적인 값과 다소 차이가 있었다. 이는 Ferguson 등¹²⁾의 연구결과와 마찬가지로 동관에서는 pH에 따라서 생성되는 부식생성물 즉, 스케일의 성상이 다소 차이가 있기 때문에 발생하는 현상이라고 판단되기도 하며, 또한 실험대상 원수를 증류수로 하였기 때문에 일반 수도물의 성상과는 다소 차이가 있기 때문이라 생각된다.

2. 염소이온에 의한 영향

본 연구에서는 염소이온의 농도를 10, 25, 50, 100, 150 mg/l로 조절한 다음 모의급수관망에서 대상원수를 순환시키면서 부식속도측정기로 동관의 공식 경향과 균일 부식속도를 측정하였으며, 측정결과는 Table 3과 같다.

일반적으로 염소이온은 금속과 반응하여 비활성 표면을 파괴시켜 금속을 용해시킴으로써 금속보호 산화막의 형성을 막아 배관의 공식 부식을 일으킨다고 보고¹³⁾하고 있다. 본 연구에서는 Table 3에서 나타난 바와 같이 공식 경향은 염소이온이 증가함에 따라 증가하여 일반적인 염소이온의 특성을 그대로 보여주고 있으나, 부식속도는 염소이온의 농도가 증가할수록 감소되는 경향을 보여 주었다. 이를 통해서 동관의 공식에는 염소

Table 3. Pitting tendency and corrosion rates with different chloride concentrations in simulated distribution system

Parameter	Chloride (mg/l)				
	10	25	50	100	150
Pitting tendency	0.5	0.8	1.0	1.1	1.2
Corrosion rate (Miles per year)	1.086	1.028	1.008	0.999	0.998

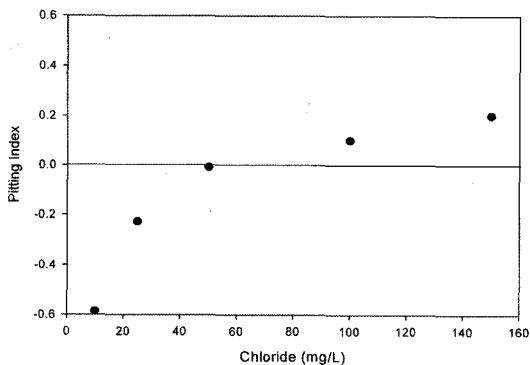


Fig. 4. Pitting index with different chloride concentration in simulated distribution system.

이온이 매우 크게 기여하고 있으나, 균일부식에는 적은 기여를 하고 있음을 확인하였다.

Fig. 4는 Table 3의 결과값을 이용하여 염소이온에 따른 공식 지수를 구한 것이다. 염소이온의 농도가 증가할수록 공식 지수는 증가하였으며, 이러한 결과는 공식 경향도 증가하였음을 의미한다. 실제 동관의 부식에 있어서 문제가 되는 것은 균일부식보다는 공식 부식으로 동관을 옥내급수관으로 사용하고 있는 대부분 건축물에서 종종 공식에 의한 누수 결함이 보고되고 있다.⁷⁾

3. pH, 알칼리도, 염소이온농도의 상호작용에 따른 영향

본 연구에서는 염소이온 농도를 25, 50 mg/l로, pH는 7, 8로 조절하고, 알칼리도는 10, 50, 100, 150 mgCaCO₃/l로 변화시켰을 때 모의급수관망에서 대상원수를 순환시키면서 부식속도측정기로 동관의 공식 경향과 균일부식속도를 측정하였으며, 그 결과는 Table 4와 같다.

Table 4. Pitting tendency and corrosion rate with different pH, alkalinity, and chloride concentration in simulated distribution system

Parameter		Alkalinity (mgCaCO ₃ /l)			
		10	50	100	150
Pitting tendency	Chloride pH 7	1.0	1.3	1.5	2.6
	25mg/l pH 8	0.1	0.7	1.4	2.1
	Chloride pH 7	1.0	1.5	1.7	2.1
	50 mg/l pH 8	0.3	0.5	0.8	1.4
Corrosion rate (Miles per year)	Chloride pH 7	0.995	0.998	1.002	1.005
	25 mg/l pH 8	0.841	0.856	0.874	0.907
	Chloride pH 7	1.007	1.009	1.015	1.032
	50 mg/l pH 8	0.874	0.884	0.889	0.907

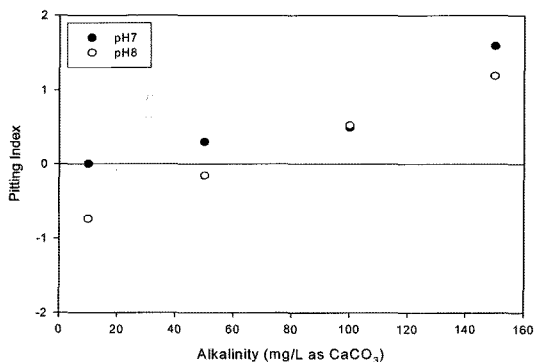


Fig. 5. Pitting index with 25 mgCl⁻/l in simulated distribution system.

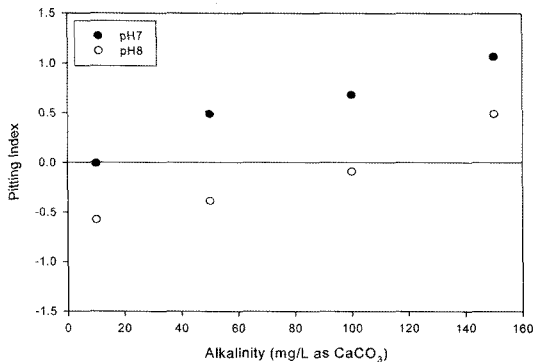


Fig. 6. Pitting index with 50 mgCl⁻/l in simulated distribution system.

Fig. 5와 Fig. 6은 Table 4의 결과값을 이용하여 염소이온에 따른 공식 지수를 구한 것이다.

Fig. 5에 나타난 바와 같이 염소이온 농도가 25 mg/l 일 때 알칼리도가 증가할수록 공식 지수가 증가하고 있는데, 이러한 결과는 동관에서 일정농도 이상의 염소이온이 존재할 때 알칼리도가 증가할수록 공식 문제가 발생될 수 있음을 의미한다. Fig. 5에서 보듯이 알칼리도가 50 mgCaCO₃/l 이하에서는 상대적으로 공식이 적게 발생될 수 있지만, 50 mgCaCO₃/l 이상에서는 공식이 크게 발생할 가능성이 있음을 확인하였다. 그러나 pH 8일 때보다는 pH 7일 때 공식이 상대적으로 크게 일어남을 알 수 있다.

염소이온 농도가 50 mg/l로 존재할 때 알칼리도에 따른 공식 지수를 Fig. 6에 나타내었는데, 이는 염소이온 농도가 25 mg/l일 때와 유사한 경향을 보여주었다. 즉, pH 8일 때 공식이 일어나는 알칼리도의 범위는 100 mgCaCO₃/l 이상이며, pH 7일 때는 상대적인 차이는 있지만 모든 알칼리도의 범위에서 공식이 일어남을 알 수 있었다.

따라서 동관 내부의 수돗물 중 염소이온이 25 mg/l 이상 존재하고 있을 때에는 pH를 8정도, 알칼리도는 50 mg/l 이하로 존재하는 것이 공식 부식을 줄일 수 있는 방법이라고 생각된다.

4. 수돗물의 pH, 알칼리도, 염소이온에 의한 영향

본 연구에서는 실험실 내의 실제 수돗물의 pH와 알칼리도를 조절하여 동관의 공식 경향과 균일 부식속도를 평가하였는데, 대상원수로 이용한 수돗물의 pH는 7.30, 알칼리도는 49.3 mgCaCO₃/l, 염소이온의 농도는 26.17 mg/l이었다. 이와 같은 특성을 지닌 수돗물에 pH를 7.5, 8.0, 8.5로 조절하였으며, 각각의 pH에 대해서 알칼리도가 100, 150 mgCaCO₃/l일 때 모의급수관망을

Table 5. Pitting tendency and corrosion rate with different pH and alkalinity in simulated distribution system

Parameter		Alkalinity (mgCaCO ₃ /l)		
		49.3	100	150
Pitting tendency	pH 7.3	1.2	1.6	1.8
	pH 7.5	0.9	0.2	0.1
	pH 8.0	0.2	0.1	0.1
	pH 8.5	0.2	0.2	0.1
Corrosion rate (Miles per year)	pH 7.3	0.884	0.886	0.941
	pH 7.5	0.883	0.885	0.934
	pH 8.0	0.874	0.878	0.879
	pH 8.5	0.854	0.841	0.730

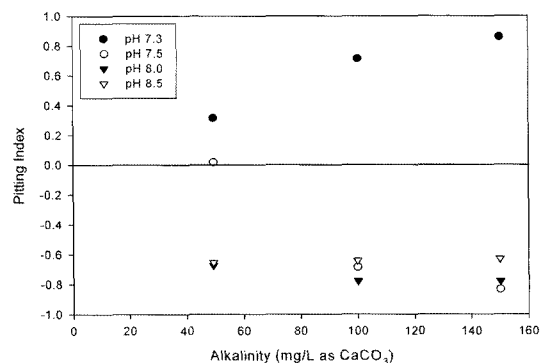


Fig. 7. Pitting index with different pH and alkalinity in simulated distribution system.

운전한 후 부식속도측정기로 동관의 공식 경향과 균일 부식속도를 측정한 결과는 Table 5와 같다.

Table 5에 나타난 바와 같이 수돗물의 pH가 증가할수록 균일 부식속도는 감소하였다. pH 7.3, pH 7.5, pH 8.0에서는 알칼리도가 증가할수록 부식속도가 증가하는 경향을 나타내고 있으나, pH 8.5에서는 알칼리도가 증가할수록 부식속도가 감소하는 경향을 나타내고 있는데, 이는 pH 8.1 이상일 경우에는 수중에 존재하는 알칼리도가 동관의 표면을 부동태화시켜 부식속도를 감소시킨다는 Drogowska 등¹⁴⁾의 연구결과와 일치하고 있다.

Fig. 7은 Table 5의 결과값을 이용하여 공식 지수를 구한 것이다. 수돗물에 pH와 알칼리도를 조절하지 않았을 때 즉, pH 7.3, 알칼리도 49.3 mgCaCO₃/l에서의 공식 지수는 0.316으로 공식 문제가 발생될 수 있음을 확인하였다. 또한 pH 7.3에서는 알칼리도가 증가할수록 공식 지수가 증가하여 동관 표면에 공식의 발생빈도가 증가할 수 있음을 알 수 있었다. 이와 반면 pH 7.5, 8.0, 8.5에서는 알칼리도와는 관계없이 공식 지수가 음

의 값을 나타내 공식으로 인한 문제가 발생되지 않음을 알 수 있었다.

이와 같은 결과를 종합하여 볼 때 현재 옥내급수관으로 가장 많이 이용되고 있는 동관의 공식 부식을 방지하기 위해서는 우선적으로 pH를 7.5 이상 유지할 필요성이 있음을 확인하였으며, 따라서 현재 국내 정수장에서 응집보조제로 이용되고 있으나, 사용상의 불편 때문에 이용을 기피하고 있는 pH 조절제인 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 의 이용에 대한 보다 심도깊은 연구가 필요할 것으로 사료된다.

IV. 결 론

현재 국내에서 옥내급수관으로 가장 많이 사용되고 있는 동관에서의 공식 부식의 영향을 고찰하기 위해 주요 수질영향인자인 pH, 알칼리도, 염소이온이 동관이 장착된 모의급수관망에서 균일부식속도와 공식 부식에 미치는 영향을 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 증류수를 대상으로 pH는 7, 8, 9, 알칼리도는 10, 50, 100, 150 mgCaCO_3/l , 염소이온 농도는 25, 50 mg/l 를 조절하여 동관의 부식에 대해 실험한 결과, 공식 부식을 일으킬 가능성이 있는 공식 지수는 pH에 관계없이 알칼리도와 염소이온 농도가 증가할수록 증가하는 경향을 보였다. 또한 동관 내부의 수돗물 중 염소이온이 25 mg/l 이상 존재하고 있을 때에는 pH를 8정도, 알칼리도는 50 mg/l 이하로 조절하는 것이 공식 부식을 줄일 수 있는 방안이라 생각된다.

2. 실제 실험내의 수돗물을 대상으로 pH는 7.3, 7.5, 8.0, 8.5, 알칼리도는 100, 150 mgCaCO_3/l 로 조절하여 동관의 부식에 대해 실험한 결과, pH가 증가할수록 균일 부식속도는 감소하는 추세를 보였다. 대조군(blank)으로 이용된 pH 7.3에서는 알칼리도가 증가할수록 공식 지수가 증가하였고, pH 7.5, 8.0, 8.5에서는 알칼리도와는 관계없이 공식 지수가 음의 값을 나타내었다.

3. 결론적으로 국내에서 옥내급수관으로 가장 많이 사용되고 있는 동관의 공식 부식을 방지하기 위해서는 가장 중요하게 고려되어야 할 것이 pH이며, pH를 최소한 7.5 이상으로 조절하는 것이 필요하다. 따라서 그동안 정수장에서 응집보조제로 이용되어 왔던 소석회($\text{Ca}(\text{OH})_2$)가 부식에 어떠한 영향을 미치는가에 대한 종합적인 연구가 추가적으로 되어야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 청운대학교 연구비의 지원에 의하여 연구되었으며, 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

- 윤태호, 이윤진, 이옥재, 이의광, 김현, 이동찬, 남상호 : 수돗물 배급수 계통의 유리잔류염소농도에 따른 중속영양세균의 거동에 관한 연구. 한국환경위생학회지, **28**(3), 9-18, 2002.
- Lee, Y. J. : Efficiency comparison between chlorine and chlorine dioxide to control bacterial regrowth in water distribution system. *Korean Journal of Environmental Health*, **32**(4), 282-291, 2006.
- 구성은, 우달식, 이두진, 김주환, 안효원, 문광순 : 수질제어 및 부식억제에 의한 상수도관의 내부부식 제어. 상하수도학회지, **20**(2), 215-223, 2006.
- 안효원, 우달식 : 상수도 배급수시설 부식방지를 위한 부식억제제 적용의 현안과 과제. 한국상하수도협회지, **8**, 96-103, 2004.
- 우달식, 구성은, 이병두, 김주환, 문광순 : 배급수 계통에서 부식억제제 적용에 따른 부식과 적수와의 상관관계. 상하수도학회지, **19**(1), 68-77, 2005.
- Nishikata, A. : Passivation and its stability on copper in alkaline solutions containing carbonate and chloride ions. *Corrosion Science*, **31**, 287-296, 1990.
- 서울특별시 : 옥내급수관 및 저수조 관리개선방안 보고서. 2005.
- Edwards, M., Hidmi, L. and Gladwell, D. : Phosphate inhibition of soluble copper corrosion by-product release. *Corrosion Science*, **44**, 1057-1071, 2002.
- Edwards, M., Ferguson, J. F. and Reiber, S. H. : On pitting corrosion of copper. *Journal of American Water Works Association*, **86**(7), 74-90, 1993.
- 이윤진, 남상호 : 상수도 배급수관망의 부식방지를 위한 인산염계 방청제 적용에 관한 연구. 한국환경위생학회지, **29**(3), 65-71, 2003.
- Cruse, H. and Pomeroy, R. D. : Corrosion of copper pipes. *Journal of American Water Works Association*, **67**(8), 479-485, 1974.
- Ferguson, J. F., O. van Franque and Schock, M. R. : Internal corrosion of water distribution system: Corrosion of copper in portable water system. American Water Works Association Research Forum, DVGW-Technologiezentrum Wasser, 233, 1996.
- 우달식, 명복태, 문정기, 문광순 : 부식억제제를 이용한 Pilot Plant에서의 제철소 개방순환형 냉각시스템 부식제어에 관한 연구. 대한환경공학회지, **26**(10), 1150-1157, 2004.
- Drogowska, M., Brossard, L. and Menard, H. : Copper dissolution in NaHCO_3 and $\text{NaHCO}_3 + \text{NaCl}$ aqueous solutions at pH 8. *Journal of Electrochemical Society*, **139**, 39-47, 1992.