

## 수돗물의 pH가 동관의 부식에 미치는 영향

민 성 기·나 승 찬·황 운 석<sup>†</sup>

인하대학교 신소재공학부, 인천시 남구 용현동 253  
(2009년 12월 2일 접수, 2009년 12월 30일 수정, 2009년 12월 30일 채택)

### The Influence of pH on Corrosion Behavior of Copper Tubes in Tap Water

Sung-Ki Min, Seung-Chan Na, and Woon-Suk Hwang<sup>†</sup>

School of Materials Science and Engineering, Inha University,  
253 Yonghyundong, Namgu, Incheon, 402-751, Korea

(Received December 2, 2009; December 30, 2009; Accepted December 30, 2009)

Copper tubes are widely used in the distribution systems of drinking water throughout the world because of their excellent corrosion resistance, high thermal conductivity, and ease of fabrication. However, corrosion problems from copper tubes as blue water phenomenon and leakage have been reported appreciably. The effect of pH on the corrosion behavior of copper tube for tap water was investigated by electrochemical voltammetric techniques in synthetic tap water. And the copper corrosion cases were discussed from the viewpoint of factors affecting the corrosion rate such as pH, alkalinity, LSI(Langelier Saturation Index), and concentration of bicarbonate and dissolved carbon dioxide.

**Keywords** : tap water, copper, tube, corrosion, pH

## 1. 서 론

동관은 우수한 내식성, 가공의 용이성, 열전도성, 경제성 등의 장점으로 건축설비와 가정용 및 산업용 급수·급탕관 등의 용도로 많이 사용되어 오고 있다.<sup>1)~3)</sup>

통상적인 담수 중에서 동관은 동관 표면에  $Cu_2O$ 나 염기성 탄산동  $[CuCO_3 \cdot Cu(OH)_2]$ 의 치밀한 보호피막이 형성되어 평균 부식속도가 0.005 mm/y 정도로 내식성이 매우 우수하다.<sup>4)~6)</sup> 그러나 수돗물 수질 및 상태에 따라 이러한 피막의 형성은 조기에 이루어지지 않을 수 있다. 이와 같은 경우에 욕조의 물이 푸른색으로 보이거나 욕조나 세면기, 욕실타일 등에 청색 또는 청녹색의 물질이 부착하는 청수현상이 발생하기도 한다.

일반적으로 이와 같은 청수현상은 시간이 지나면 동관 표면에 산화피막이 형성되어 자연적으로 소멸되는 경우가 대부분이다. 그러나 우리나라와 같이 수돗물을 그대로 음용수로 사용하는 지역에서는 수도꼭지를 통하여 공급되는 수돗물에서 발생하는 현상이기 때문에, 한 번 청수현상이 발생하면 사회적으로 큰 문제로 대두되기도 한다.

청수발생에 영향을 미치는 수돗물의 제반 인자로는 pH, 염소이온농도, 유리탄산농도, 알카리도, 용존산소농도, 경

도 등이 있으며, 또한 이들 환경인자들이 복합적으로 작용하여 Cu의 전기화학적 거동에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.<sup>7)</sup>

그러므로 동관의 청수발생을 억제하기 위하여는 수돗물 중의 제 인자가 동관의 전기화학적 거동에 어떠한 영향을 미칠 것인가에 대한 분석과 더불어, 이에 따른 동관 표면에서의 미량의 Cu이온 용출속도를 정량화한 데이터가 필요하다. 그러나 수돗물의 수질관 환경인자는 지역에 따라 다른데도 불구하고, 이에 대한 분석은 지금까지 일부 지역에 한해서만 수행되어왔으며, 정량적인 자료가 충분히 확보되어 있다고는 할 수 없는 상태이다.

따라서 본 연구에서는 급수용 배관으로 사용되고 있는 동관에서 발생하는 청수현상에 영향을 미치는 제 인자인 수돗물의 pH, 온도, 염소이온농도, 유리탄산농도, 알카리도 중 우선적으로 pH의 영향을 전기화학적으로 분석, 평가하였다. 그리고 이를 바탕으로 하여 국내외의 청수가 발생한 사례에 대한 분석을 통하여, 청수발생을 억제하고 동관의 내식성을 개선할 수 있는 방법을 확립하고자 하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 인공수돗물 제조

실험에 사용된 전해질은 수돗물을 모사하기 위하여 서울

<sup>†</sup> Corresponding author: wnschwang@inha.ac.kr

**Table 1. Analysing results of tap water in Seoul**

Hardness	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	pH
61.1 ppm	15.4 ppm	14 ppm	7.2±0.05

**Table 2. Preparing method of synthetic tap water**

	Addition	Concentration
HCl(35%)	2.93 g/l	1,000 ppm (Cl <sup>-</sup> )
MgSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O(99%)	24.6 g/l	1,000 ppm (Mg) 960 ppm (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (95%)	1.07 g/l	1,000 ppm (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )

지역 수돗물<sup>8)</sup>의 대표성분인 경도, Cl<sup>-</sup>농도, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>농도, pH를 맞추어 제조하였다. 경도는 칼슘 경도와 마그네슘 경도를 8:2비율로 하였다. 서울시의 2006년 연평균 경도, 염소이온 농도, 황산이온 농도 및 pH를 Table 1에 나타내었다. 이러한 조건의 인공수돗물 용액을 만들기 위하여 Table 2와 같은 희석용액 11를 1차적으로 만들어 사용하였으며, 모든 희석용액의 제조에는 이온교환수지를 거친 순수로 제작하였다.

칼슘경도는 CaCO<sub>3</sub> 0.05 g을 첨가하여 48.9 ppm이 되도록 하였다. 마그네슘의 경도는 MgSO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O 희석 용액을 12.2 ml 첨가하여 12.2 ppm으로 하였다. 염소 이온 농도를 15.4 ppm으로 조절하기 위하여, 희석한 HCl 용액을 15.4 ml를 첨가하였다. 황산이온의 농도는 이미 MgSO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O를 12.2 ml를 첨가하여 11.7 ppm이 용액 안에 포함되어 있는 상태이기 때문에, 2.3 ppm에 해당하는 2.3 ml의 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 희석용액을 첨가하였다.

용액의 pH를 조절하기 위하여 0.1 M HNO<sub>3</sub>와 0.1 M NaOH를 사용하였다. 제조한 인공수돗물의 전기전도도는 163.9 μS/cm 이었다.

**2.2 시험편 준비**

시험편으로는 두께 1 mm의 순Cu판을 사용하였다. 각 시험편은 1.4 cm으로 절단하여 준비하였고, 시험편과 전기적 접촉을 위하여 시험편 뒷편에 단자를 도타이트로 연결하였다. 충분한 시간이 지난 다음 에폭시 수지 및 에폭시 경화제를 사용하여 시험편의 면적만이 용액에 노출되도록 나머지 부분은 마운팅 처리하여 제작하였다. 그 후 시험편 측면에 구멍을 내어 피복된 구리선으로 연결한 뒤 RTV 고무로 구멍과 도선 사이의 틈을 봉하였다.

시험편 표면은 에머리지 #600까지 연마한 후, 메틸알코올로 60s간 초음파 탈지하고, 60s간 이온교환수에서 초음파 세척 후, 이온교환수로 다시 수세하였다. 그리고 10 mm x 10 mm의 창을 낸 절연 고무테이프를 마스킹하여 노출면

적을 1 cm<sup>2</sup>로 고정하였다.

**2.3 전기화학실험**

기준전극으로는 포화칼로멜전극을 사용하였고, 대극으로는 백금전극을 사용하였다. 시험기기로 EG&G Princeton Applied Research사의 Potentiostat/Galvanostat Model 273A를 사용하였다.

전기화학시험용 전해조는 1l 용량의 파이렉스 전해조를 사용하였다. 전해조는 항온조 중에 설치하여 온도조절을 하였다. 모든 실험은 25±1 °C를 유지한 상태에서 수행하였다.

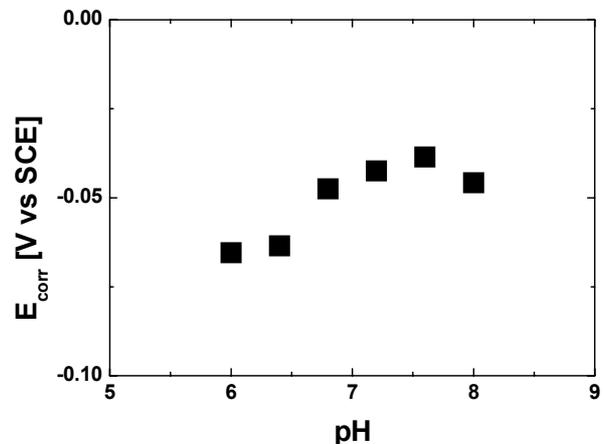
**3. 실험결과**

인공수돗물의 pH, 온도, 알칼리도 및 염소이온, 유리탄산이온의 농도 등의 인자는 Cu의 부식 거동과 부식속도에 영향을 미친다. 이 중 pH의 영향에 대하여 검토하기 위하여 pH 조건을 변화시키며 전위의 변화와 분극실험을 수행하였다.

25 °C의 인공수돗물에서 pH를 6, 6.4, 6.8, 7.2, 7.6, 8.0으로 변화시키며 부식전위를 측정하고 동전위분극 실험을 수행하였다. 부식전위 측정 결과를 Fig. 1에 나타내었다.

전반적으로 pH가 증가할수록 전위는 상승하는 경향을 보였다. pH 6.0에서는 부식전위가 -0.065 V이었는데, pH가 증가할수록 비교적 급격히 상승하여 pH 6.8에서는 -0.047 V이었다. 그러나 pH 6.8이상에서는 pH 증가에 따른 전위상승은 크지 않았다.

Fig. 1의 조건에서 동전위분극실험을 통하여 얻은 분극곡선과 이를 토대로 부식전류밀도를 구한 결과를 Fig. 2와 Fig. 3에 정리하였다. 부식전류밀도는 pH가 감소하면 증가하는 경향을 나타내었는데, pH 6.4이하에서는 급격한 증가를 보여주고 있다. 즉, pH 8에서는 부식속도는 0.31 μA/cm<sup>2</sup>이었으며, pH 6.4에서는 0.79 μA/cm<sup>2</sup>로 증가하여



**Fig. 1.** Corrosion potential of copper with pH in synthetic tap water.

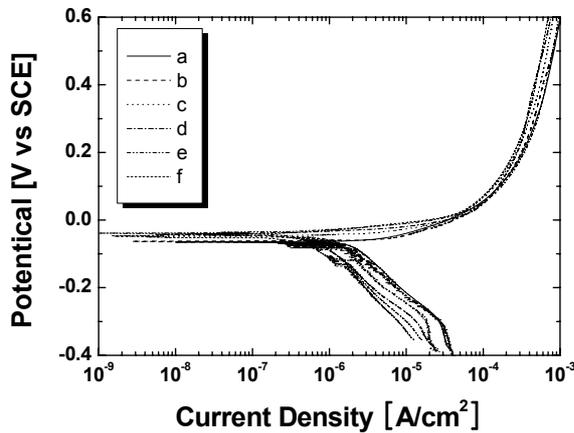


Fig. 2. Potentiodynamic polarization curves of copper with pH in synthetic tap water. (a) pH6.0, (b) pH6.4, (c) pH6.8, (d) pH7.2, (e) pH7.6, (f) pH8.0.

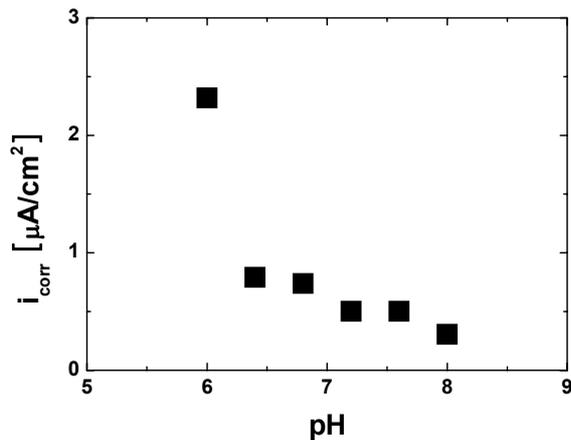


Fig. 3. Corrosion current density of copper with pH in synthetic tap water.

부식속도의 증가는 그렇게 크지 않았다. 그러나, pH가 6.4에서 6.0으로 감소하면 부식전류밀도는  $2.32 \mu A/cm^2$ 으로 급격히 증가하였다. 이는 Fig. 1에서의 pH에 따른 부식전위의 변화 양상과 같은 경향을 나타내고 있다.

이와 같은 경향은 본 실험뿐만 아니라 기존의 연구결과에서도 보여주고 있는데, 우리와 유사한 수질을 나타내는 일본에서도 pH 6.5이하에서 부식속도의 급격한 증가를 나타내는 결과를 보고하고 있다.<sup>9),10)</sup> 또한 Herbst<sup>11)</sup>도 수돗물의 수질은 본 연구와 조금 다르나 pH 6.0- 9.0범위에서 Cu의 용출량을 측정된 결과, 본 연구 결과와 유사한 pH 6.4 이하에서 용출량의 급격한 증가를 보고하였다.

그리고 Fig. 4에 Fig. 3의 부식전류밀도값을 이용하여 pH의 변화에 따른 수돗물에서 Cu의 부식속도를 계산한 결과를 정리하였다. 본 실험에서 구한 부식전류밀도 값은 초기 부식속도로서 실제 Cu의 부식속도보다는 높은 값이다. 그것은 수돗물 중에서 동관이 사용될 때, 표면에 산화피막을 형성하

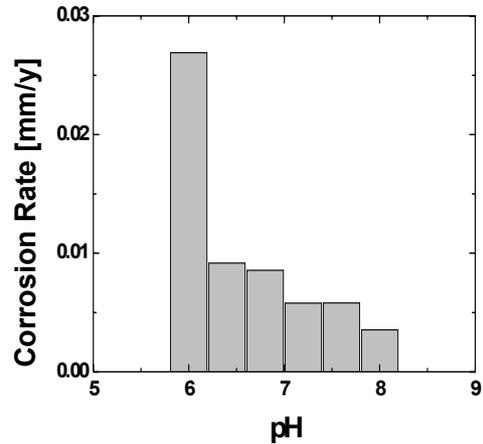


Fig. 4. Annual corrosion rate of copper with pH in synthetic tap water.

여 이 산화피막에 의해 Cu의 부식속도는 감소하게 되기 때문이다.

서울지역 수돗물의 평균 pH에 해당되는 pH 7.2에서는 연간 부식속도는  $0.0058 \text{ mm/y}$ 로서 Cu의 내식성이 매우 우수한 결과가 얻어졌다. pH 6.8에서는  $0.0086 \text{ mm/y}$ 로 부식속도가 약 50% 정도 증가 하였으며, pH 6.0에서는  $0.0269 \text{ mm/y}$ 로 급격히 상승하여 일반 수돗물 pH 7.2의 부식속도보다 약 4.5배의 부식속도를 나타내었다.

#### 4. 고 찰

일반적으로 동관은 통수가 시작되면 내면에  $Cu_2O$ 의 산화피막을 형성하여 시간경과에 따라 Cu이온의 용출은 감소한다. 그러나 수질에 따라서는 동관내면에 보호피막이 형성되기 어렵고 계속하여 용출이 일어나는 경우가 일부 보고되어 있는데, 이와 같은 경우를 대상으로 하여 동관의 부식속도를 증가시키는 환경조건에 대하여 검토하기로 한다.

한국과 일본의 음용수 수질 기준에서는 Cu의 허용기준이 1 ppm이하로 되어있으며, WHO의 음용수 수질기준은 2 ppm이하이고, 미국의 USEPA에서는 1.3 ppm 이하이다. 미국에서는 급수관로로서 동관이 사용되고 있기 때문에 최종 수도관에서는 1.3 ppm 이하로 하는 것이 쉽지 않아 정수장에서 정인산염, 인산아연, 올드린산염 또는 폴리인산염을 주입하는 대책이 수행되고 있다.

반면에 한국의 수돗물은 연수에 해당하므로, 탄산칼슘의 치밀한 피막을 금속표면에 형성하여 관의 내식성을 개선하는데는 매우 불리하다. 세계의 주요 음용수에 대한 LSI지수의 값을 Fig. 5에 정리하여 나타내었다.

서구의 경우 음용수는 대부분 경수이므로 LSI값이 0보다 크기 때문에 탄산칼슘의 피막이 형성되기 쉬우나, 국내의 수돗물의 경우는 Fig. 5와 Table 3에 나타낸 바와 같이,

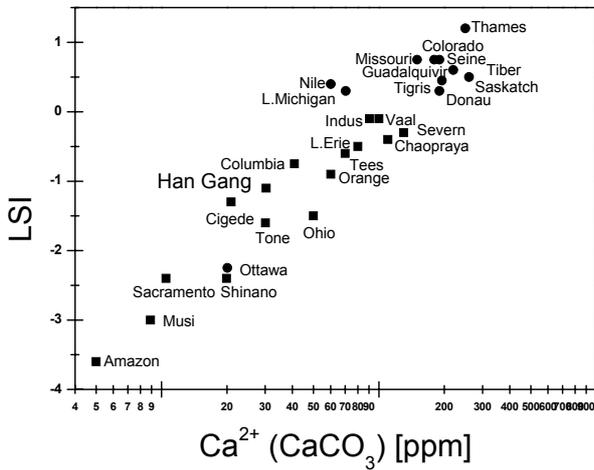


Fig. 5. LSI of drinking water in several regions.

Table 3. LSI values of tap water in Korea<sup>12)</sup>

	Seoul	Busan	Gwangju
LSI	-1.6	-1.72	-2.48

LSI값이 서울의 경우 -1.6, 광주의 경우 -2.48로서 탄산염 피막이 형성되지 않아 통수되고 상당기간 동안은 상대적으로 부식성이 높다고 할 수 있다. 따라서 국내에서는 수도물의 수질조건에 따라 동관의 부식성은 변화할 수 있으므로, 부식발생에 핵심이 되는 수질조건을 찾는 것이 매우 중요하다.

우리와 수질이 유사한 일본에서 청수문제가 발생한 수질을 조사한 결과를 Table 3에 정리하였다.<sup>12)</sup> 일본의 경우도 수질이 연수이어서 LSI지수가 음수이므로 탄산칼슘의 피막은 형성되기 어렵다. Table에서 특기할 사항은 청수가 발생한 음용수의 pH가 6.8이하로서 산성을 나타내고 있다. 즉, pH가 낮을수록 Cu이온의 용출속도는 증가하며 초기용수에서는 3 ppm을 초과하는 경우도 있고, 관내에 물이 정체하고 있는 동안에 용출이 발생하는 것을 알 수 있다.

또한, 일본 도쿄의 정수장을 대상으로 하여 수질과 부식성을 분석한 자료를 Table 4와 Table 5에 정리하였다.<sup>13),14)</sup> Asaka정수장의 경우는 pH가 6.9이고, Kinutashimo정수장의 pH는 6.4이었다. 그 밖의 다른 조건은 대동소이하였으나, 전탄산농도는 Kinutashimo의 경우가 약 3배 정도 높았다. Kinutashimo 정수장에서 전탄산농도가 높았음에도 불구하고 pH값이 낮아, 부식속도는 Asaka정수장과 비교하여 2배 이상 높은 값을 나타내었다.

문헌상의 6개월 - 12개월 동안 pH가 다른 수도물에 대하여 부식속도를 측정된 결과를 Fig. 6에 정리하였는데, 여기서도 pH 6.5를 경계로 이 보다 낮은 pH에서는 부식속도가 급격히 상승하고 있다.

뉴질랜드에서는 1995년 NZ Drinking Water Standards

Table 4. Analysing results of tap water which occurred blue water problem in Japan<sup>13),14)</sup>

	unit	Okayama	Tokyo	Hokkaido
service		hot water	tap water	hot water
pH	-	6.2	6.7	6.8
conductivity	uS/cm	132	190	190
Ca hardness	mg/l CaCO <sub>3</sub>	28	72	30
M alkalinity	mg/l CaCO <sub>3</sub>	29	78	25
bicarbonate	mg/l	35	30	8
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mg/l	-	-	26
Cl <sup>-</sup>	mg/l	12	23	17
silicate	mg/l	18	27	46
residual chloride	mg/l	0	0.4	0.3
Cu ion(inlet)	mg/l	3.6	-	3.3
Cu ion(outlet)	mg/l	1.8	0.3	0.05

Table 5. Analysing results of water quality of tap water in water purification plant(Tokyo, Japan)<sup>14)</sup>

	Asaka	Kinuta-shimo
temperature	15.9	15.8
pH	6.9	6.4
conductivity	262	308
hardness	74	77
alkalinity	33.7	59.0
bicarbonate	46.0	120.5
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	45	41
Cl <sup>-</sup>	21.3	19.2
residual chloride	1.4	1.4

에서 권장 pH를 6.5-8.5로 제시하였다. 그러나 Christchurch 지역의 남부와 서부에서는 pH가 6.7로 가장 낮은 값을 나타내었는데 이 지역에서 청수가 발생하여, 2000년 이를 7.0-8.5로 하한의 pH값을 0.5 상승시켰다.

국내에서 청수문제가 발생한 충청북도 대단위 아파트의 지하저수조의 pH에 따라 Cu의 부식속도를 실험한 결과를 Table 7에 나타내었는데, 여기서도 pH가 6.4이하로 감소하면 부식속도는 급격히 증가하였다.<sup>15)</sup> 또한 동비누 현상에 의한 청수문제가 발생한 군산지역의 아파트의 경우도 pH는 6.2 - 6.9로 비교적 산성이었다.

이와 같이 Cu의 부식거동은 중성 근처의 pH변화에 매우 민감하다. Cu표면에 형성되는 보호피막으로서의 침전피막의 용해도는 pH 의존성이 높기 때문에, pH가 아주 약간 산성측인 수중에서도 Cu표면의 보호피막 형성은 저지되어 청

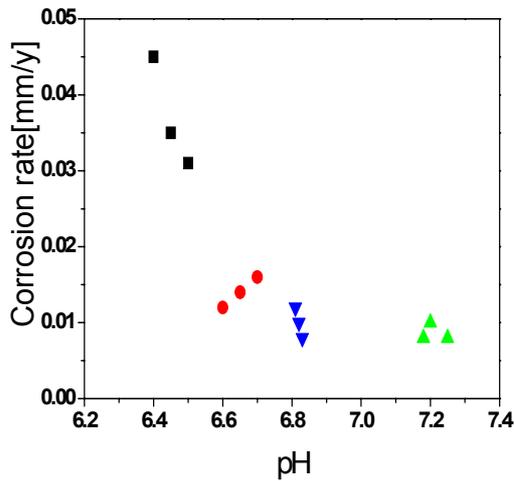


Fig. 6. Corrosion rate of copper with pH in several regions<sup>13,14)</sup>

Table 6. Analysing results of corrosion rate of tap water in water purification plant(Tokyo, Japan)<sup>14)</sup>

water purification plant	corrosion rate(mdd)
Asaka	4.11
Kinuta-shimo	8.68

Table 7. The results of corrosion rate experiments of tap water in a feed tank of apartment in chungcheungbook-do<sup>15)</sup>

pH	8.5	8.0	7.5	7.0	6.4	6.0
corrosion rate (mm/y)	0.121	0.181	0.220	0.243	0.448	0.623

수문제가 발생할 수 있다. 따라서 가장 바람직한 것은 동관의 부식이 급격히 증가하기 시작하는 임계pH를 명확하게 결정하는 것이다. 그러나, 전술한 바와 같이 Cu의 부식속도는 pH 뿐만 아니라 유리탄산농도, 알칼리도, 용존CO<sub>2aq</sub>농도 등이 복합적으로 관계하고 있어 일률적으로 임계값을 결정할 수는 없다. 뿐만 아니라 pH가 거의 중성값인 6.9에서도 유리탄산농도나 [CO<sub>2aq</sub>] 농도에 따라 부식속도가 높은 경우도 존재한다. 그러나, Fig. 3과 Fig. 4에 나타난 본 실험의 결과나 위의 실례를 보면, pH 6.5이하의 수돗물에서는 명백히 부식장애가 발생하는 경향이 증가하고 있는 것은 확실하며, 국내에서는 수돗물의 pH는 적어도 이보다는 높은 값을 유지하여야 할 것이다.

이들 결과를 정리하면, 우리나라와 같이 수돗물이 연수이어서 탄산칼슘 침전피막에 의해 내식성 개선이 어려운 경우에는 동관의 부식은 특히 pH에 대한 의존성이 높으며, 유리탄산농도가 높을 경우에는 pH에 대한 완충효과도 작용하여 용출속도가 증가하고 청수현상을 일으킬 확률도 높아진다.

Table 8. Guidelines of tap water quality for prevention of blue water phenomenon<sup>10)</sup>

Item	Target	Remarks
pH	6.8 - 8.0	No problem when this is 6.5 or more
Do	-	Dissolved oxygen, though related to corrosion, this should be judged with other factors
Residual chlorine	As low as possible	In particular, injection of excess chlorine should be avoided during initial water supply
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	30mg/l >	20mg/l or less in the normal city water
Cl <sup>-</sup>	30mg/l >	Mostly 10-3030mg/l in the city water
SiO <sub>2</sub>	-	
Total hardness	60-90mg/l	
M-alkalinity	20-60mg/l	
Langelier index	(+)	(+) : Calcium carbonate tends to be precipitated (-) : Corrosion tends to occur
Relative conductivity	150uΩ/cm >	

즉, 유리탄산을 포함하는 수돗물은 낮은 pH가 유지되기 때문에 동관내면에 생성되는 산화피막이 용해도가 높고 용존산소가 존재하면 전기화학반응에 의해 Cu이온의 용출이 계속된다.<sup>16),17)</sup> 따라서 동관의 청수방지와 내식성 증대를 위해서는 pH와 유리탄산농도에 대한 관리가 다른 무엇보다도 가장 중요하다고 할 수 있다.

일본방식협회에서는 백관, 탄소강관, 스테인리스강관, 수지라이닝강관 등에 대하여는 수질에 따른 배관재료의 선택 가이드라인을 제시하고 있으나, 동관에 대하여는 그 인자들이 복합적으로 작용하고 있어 아직 가이드라인을 제시하지 못하고 있는 상태이다. Table 8에 Aoki<sup>10)</sup>가 동관에 대하여 제시한 가이드라인을 정리하여 나타내었다.

Table을 보면 목표 pH는 6.8-8.0으로 적어도 6.5이상의 pH를 제시하고 있다. 그리고 잔류염소는 적을수록 좋은 것으로 되어있다. 그 외의 인자들은 LSI값만 제외하면, 서울지역의 연평균 수질분석 평균치가 목표치의 범위에 포함되고 있다. Aoki의 가이드라인이 적절하다면 서울의 수돗물에서는 청수가 거의 발생하지 않을 것으로 판단해도 좋을 것이다.

이상의 결과를 종합하면, 유리탄산농도, 용존산소농도 등 청수발생에 영향을 미치는 인자가 많이 있으나, 그 중 pH의

영향이 가장 큰 것으로 판단된다. 본 연구에서의 pH 시험결과와 위의 분석결과로부터 정리하면, 청수현상을 방지하고 내식성 증대를 위하여는 수도물의 pH를 7.0 이상으로 유지하는 것이 무엇보다도 중요하며, 특히 6.5이하의 산성으로 되는 것은 절대적으로 피하여야 할 것으로 생각된다.

## 5. 결 론

이상의 결과를 정리하면, 우리나라와 같이 수도물이 연수이어서 탄산칼슘 침전피막에 의해 내식성 개선이 어려운 경우에는 동관의 부식은 특히 pH에 대한 의존성이 높으며, 유리탄산농도가 높을 경우에는 pH에 대한 완충효과도 작용하여 용출속도가 증가하고 청수현상을 일으킬 확률이 높아진다. 즉, 유리탄산을 포함하는 수도물은 낮은 pH가 유지되기 때문에 동관내면에 생성되는 산화피막의 용해도가 높고 용존산소가 존재하면 전기화학반응에 의해 Cu이온의 용출이 계속된다. 따라서 동관의 청수방지와 내식성 증대를 위해서는 pH와 유리탄산농도에 대한 관리가 다른 무엇보다도 1차적으로 중요하다고 할 수 있다.

따라서, 유리탄산농도, 용존산소농도 등 청수발생에 영향을 미치는 인자가 많이 있으나, 그 중 pH의 영향이 가장 큰 것으로 판단된다. 본 연구에서의 pH 시험결과와 국내외 음용수 환경에서의 각 종 부식데이터를 분석한 결과로부터 정리하면, 청수현상을 방지하고 내식성 증대를 위하여는 수도물의 pH를 7.0 이상으로 유지하는 것이 무엇보다도 중요하며, 특히 6.5이하의 산성으로 되는 것은 절대적으로 피하여야 할 것으로 생각된다.

## 감사의 글

이 논문은 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. M. Sakai and O. Seri, *Corrosion Science and Technology*, **1**, 203 (2002).
2. M. Edwards and N. Sprague, *Corrosion Science*, **43**, 1 (2001).
3. J. S. Kim and H. S. Kim, *Corrosion Science and Technology*, **6**, 154 (2008).
4. M. Kang and A. A. Gewirth, *J. Phys. Chem. B*, **106**, 12211 (2002).
5. W. Xiao, S. Hong, Z. Tang, S. Seal, and J. S. Taylor, *Corrosion Science*, **49**, 449 (2007).
6. K. Sobuea, A. Sugahara, T. Nakata, H. Imaia, and S. Magainob, *Surface and Coatings Technology*, **169**, 662 (2003).
7. T. Fujii, T. Kodama, and H. Baba, *Corrosion Science*, **24**, 901 (1984).
8. <http://water.seoul.go.kr/index.html>
9. T. Fujii, *Shindo-kishutsu-kenkyukai-shi*, **25**, 6 (1985).
10. S. Aoki, *Shindo-kishutsu-kenkyukai-shi*, **27**, 4 (1988).
11. B. Herbst, *Materials and Corrosion*, **51**, 648 (2000).
12. T. Fujii, "Kinzoku-fushoku-zirei-taishaku", Kogyotsoshakai (2002).
13. S. Yamauchi and S. Sato, *Boshokukizutsu*, **30**, 469 (1981).
14. T. Kodama, T. Fujii, and H. Baba, *Boshokukizutsu*, **30**, 462 (1981).
15. J. S. Hwang, "The Quality of Water in a Feed Tank of Apartment in Chungcheungbook-do" (1999)
16. T. Isobu and K. Hosokawa, *Shindo-kishutsu-kenkyukai-shi*, **32**, 46 (1992).
17. O. Seri and Y. Yamada, *Zairyo-to-Kankyo*, **51**, 12 (2002).