

상수도관내 중금속 용출에 대한 수소이온농도의 영향 평가 연구

이정원* · 노유래** · 박준홍***

Lee, Jeongwon* · Noh, Yoorae** · Park, Joonhong***

Influences of pH on Heavy Metal Leaching in Water Supply Pipelines

ABSTRACT

In Korea, previous certification of water supply infrastructure was mainly focused on economical and physical aspects. Recently, hygienic safety of water supply service has become a sensitive and important issue to our people for evaluating the water quality with growth of economy and education system. According on water quality in 497 Korean water supply facilities, pH values in the supplied water have ranged between 5.8-8.5. However, little is known about metal leachability at the pH conditions observed in the real water supply systems because a fixed pH condition (pH 7.0) has been used in the current standard method, 'Hygienic Safety Testing Method', in water supply. In this work, we examined the effects on heavy metal leachability with pH differences in the water supply pipes which are typically used in Korea. As a result, the amounts of metal leachability were tended to increase when pH levels were decreased. Especially at pH 5.8, Cu leachability from Cu pipes was found to exceed the public health standard level even after applying a normalization factor (NF) given by the current Korea standard method. The Cr and Cu leached from stainless steel pipes, Cd, Pb, Cu, and Zn from Cu-based pipe fittings, and Zn from Zn-based pipe fittings were exceeded the Korean hygienic safety standards while, after applying the NF, concentrations of the leached metals were satisfied with the current Korean standard. The findings from this work provide implications on the needs of reforming the current hygienic safety standard methodology.

Key words : Water supply pipeline, pH, Leaching of heavy metal, Sanitary safety in tap water

초 록

우리나라 상수도 기반시설 설비에 관련된 기존의 인증평가는 경제적 측면과 내구성 등 물리적 측면에 초점을 맞추어 사용되어 왔다. 그러나 경제수준이 상승하면서 상수도에 대한 위생, 보건, 안전성, 삶의 질에 대한 국민의식이 향상됨에 따라 상수도 서비스의 위생보건학적 품질향상이 요구되고 있다. 지난 5년간 국내 497개 정수장의 수질분석 자료를 고찰한 결과 pH는 5.8~8.5의 범위로 나타났다. 하지만, 현재 우리나라 수도용 자재 및 제품의 위생안전기준 공정시험방법(위생안전시험법)은 pH 7.0에서만 평가하고 있어, 실제 상수도 pH 조건에서 관내 중금속용출에 대한 기초정보가 부족하다. 이러한 배경으로 본 연구에서는 국내에서 대표적으로 사용되는 관에 대하여 pH변화가 중금속용출에 미치는 영향을 실험적으로 분석 연구하였다. 본 연구 결과, pH가 낮아질수록 일부 금속의 용출정도가 증가하는 것을 확인하였다. 특히 pH 5.8일 경우, 구리재질의 관에서 Cu가 보정계수(Normalization Factor) 적용 후에도 위생안전기준을 상회하였다. 스테인레스 재질의 관에서는 Cr, Cu가, 구리재질의 이음관에서는 Cd, Pb, Cu, Zn이, 아연재질의 이음관에서는 Zn이 기준치를 각각 상회하였으나 보정계수를 적용하면 기준치를 만족하였다. 본 연구의 결과로 현행 위생안전시험법에서 pH조건을 7.0 이외의 낮은 pH 조건을 포함하는 개정의 필요성이 제안되었다. 추후 상수도관으로 사용되는 다른 종류의 관에 대한 추가 연구의 필요성도 제시되었다. 본 연구는 차후 우리나라 위생안전기준의 개정연구에 필요한 기초자료 제시에 기여를 하였다.

검색어 : 상수도관, pH, 금속용출, 수도물위생안전

* 정희원 · 한국화학융합시험연구원 화학환경안전본부 환경보건평가팀 (Korea Testing and Research Institute · jwlee@ktr.or.kr)

** 정희원 · 연세대학교 토목환경공학과 석사과정 (Yonsei University · shdbfo93@hanmail.net)

*** 중신희원 · 교신저자 · 연세대학교 토목환경공학과 정교수 (Corresponding Author · Yonsei University · parkj@yonsei.ac.kr)

Received July 22, 2016/ revised September 22, 2016/ accepted October 14, 2016

1. 서론

세계보건기구(WHO)에 의하면 물에는 약 2000여 종의 물질에 의해 오염될 가능성이 있으며, 그 중 약 750여 종은 실제로 검출되고 있다(WHO, 2011). 이에 따라 각국은 먹는 물 수질기준을 정하여 먹는 물의 적합성을 평가하고 있다. 그러나 먹는 물을 이송하는 상수도관에 대한 평가는 보완될 필요가 있다. 기존 우리나라의 상수도 기반시설에 사용되는 설비는 구조적 안정성, 설치, 시공, 운영관리와 관계된 경제적 측면, 내구성 등 물리적 경제적 측면에 초점을 맞추어 사용되어 왔다. 그러나 경제 수준이 상승하면서 상수도에 대한 위생, 보건, 안전성, 삶의 질에 대한 국민의식이 향상되며 위생 보건학적 품질향상이 요구되고 있다(Ministry of Environment, 2007).

환경부의 2013년 ‘수돗물 불신해소 및 음용을 향상 방안 연구’에 의하면 수돗물을 직접 음용하는 비율은 1.0~4.1%로 나타났으며, 최근 수돗물의 음용율은 점점 감소하고 있음을 알 수 있다(Water Supply and Sewerage Policy Division, 2014). 이는 수돗물에 대한 불신에서 비롯되며, 수돗물 공급기관 혹은 국가의 수돗물 정책에 대한 국민들의 불신이기도 하다. 그 원인 중 하나가 수돗물 공급과정에서 발생할 수 있는 상수도관 재질 내 위해물질의 용출가능성이다. 따라서 수도용 자재에서의 위해물질 관리를 위해 2011년부터 수도용 자재의 위생안전기준(KC) 인증제도를 시행하고 있다(Ministry of Government Legislation, 2011).

하지만 우리나라의 위생안전기준은 미국의 NSF(National Sanitation Foundation International)에서 1988년 개발한 수도용 제품의 위생규격 NSF/ANSI-61을 간소화하여 자국의 시험방법으로 정한 일본의 시험규격(JIS 3200-7)을 거의 그대로 수용하였기 때문에 일본과 우리나라의 시험방법은 대부분 동일하다(Ministry of Environment, 2014).

제품별 사용특성을 면밀히 분석하여 제품을 8가지로 분류하고, 제품군 각각의 특성에 적합한 시험방법을 개발하여 적용하고 있는 미국과 달리 우리나라의 제품의 분류는 단순하며 시험방법도 3가지로 통합하여 적용하고 있다(Ministry of Environment, 2015). ‘서울정책이카이프’ 데이터에 따르면 서울시의 경우 수도용 급수 배관 재질이 송수관(강관), 배수관(덕타일주철관, PE관), 급수관(아연도강관, 스테인레스 강관 및 동관)으로 이루어진 것으로 알 수 있으나, 현재 국내에서 사용되는 상수도 배관 제품에 대한 체계적인 현황 자료 구축이 되어있지 않은 상태이며, 관의 특성에 따른 교체 시기에 대한 기준 역시 미비한 상태이다. 또한 미국 NSF/ANSI61의 경우 식수 시스템에 사용되는 파이프 및 관련 제품 시험 시 pH 5, pH 6.5, pH 8, pH 10으로 다양한 조건에서 시험을 진행하고 있으나(NSF, 2015) 우리나라의 위생안전기준에서는 pH 7.0 ± 0.1의 시험수만으로 시험을 진행하고 있다. 우리나라의 먹는 물 수질기준 중 pH의 기준은 5.8~8.5이며, 상수 공급 과정 중

pH가 여러 가지 환경요인으로 변동할 수 있음에도 불구하고 pH 7.0 ± 0.1로 단순화하였기에 pH 변화에 따른 상수도관의 중금속을 포함한 금속의 용출 여부는 수돗물의 안전성 확인에 중요사항이다. 하지만 이에 대한 기초자료는 매우 미흡하다. 따라서 본 연구의 목표는 pH 7보다 낮은 조건에서의 수소이온농도가 상수도 관내에서 중금속 용출에 미치는 영향을 실험적으로 연구하는 것이었다. 이를 위해서 지난 5년간 국내 497개 정수장의 수질 분석 자료를 토대로 상수관으로 사용되는 금속관 중 아연도강관, 동관, 스테인레스관 등을 이용하여 수도용 자재에 대한 중금속 용출시험을 진행하였고, pH가 상수도관의 중금속 용출에 미치는 영향과 용출경향을 파악하여서 보다 안전한 상수도관의 관리를 위한 기초자료로 제시하였다.

2. 연구방법

2.1 분석대상 시료 및 분석항목

본 연구에서는 일반 수도용 급수 배관에 사용되는 것으로 스테인

Table 1. The Types of Water Supply Pipes Tested in This Study

No.	Materials	Types	Remarks
STS-P1	Stainless	25A pipe	A Company (Korea Certification)
STS-P2	Stainless	25A pipe	B Company (Korea Certification)
STS-P3	Stainless	25A pipe	C Company (Korea Certification)
STS-P4	Stainless	25A bellows pipe	D Company
CU-P1	Copper	25A pipe	E Company (Korea Certification)
CU-P2	Copper	25A pipe	F Company (Korea Certification)
CU-P3	Copper	25A pipe	G Company (Korea Certification)
STS-E1	Stainless	90Elbow 25A pipe fitting	H Company (Korea Certification)
STS-E2	Stainless	90Elbow 25A pipe fitting	I Company
STS-E3	Stainless	90Elbow 25A pipe fitting	J Company (Korea Certification)
CU-E1	Copper	90Elbow 25A pipe fitting	K Company (Korea Certification)
CU-E2	Copper	90Elbow 25A pipe fitting	L Company (Korea Certification)
CU-E3	Copper	90Elbow 25A pipe fitting	M Company
CU-E4	Copper	90Elbow 25A bellows pipe fitting	D Company (Korea Certification)
ZN-E1	Galvanization	90Elbow 25A pipe fitting	I Company
ZN-E2	Galvanization	90Elbow 25A pipe fitting	N Company

Table 2. Hygienic Safety Standard and Limit of Quantification (LOQ) for Heavy Metals

Heavy metals	Hygienic safety standard [mg/L]	LOQ [mg/L]
Cd	< 0.0005	0.0005
Hg	< 0.0001	0.0001
Se	< 0.001	0.0005
Pb	< 0.001	0.0005
As	< 0.001	0.0005
Cr ⁶⁺	< 0.005	0.005
Zn	< 0.3	0.001
Fe	< 0.03	0.001
Cu	< 0.1	0.001

레스 강관 3종류, 동관 3종류, 스테인레스 주름관 1종류, 동 Elbow 3종류, 스테인레스 Elbow 3종류, 아연도금 Elbow 2종류, 주름관 Elbow 1종류를 대상으로 하였다. 그 중에는 기존 위생안전(KC)인증을 받은 제품도 포함되었다(Table 1). 분석항목은 비소, 카드뮴, 크롬, 구리, 납, 셀레늄, 아연, 철 수은으로 우리나라 수도법 시행령 별표 1의2의 위생안전기준 적용항목으로 하였다. 본 연구의 분석항목의 위생안전 기준과 정량한계를 Table 2에 나타내었다.

2.2 시험수 조제

시험에 사용된 시험수는 우리나라 위생안전기준 용출수 조제방법에 따라 3차 정제수(최소저항 $18 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}^{-1}$ 이상)를 사용하였으며 경도를 맞추기 위해 염화칼슘용액, pH를 맞추기 위해 염산과 수산화나트륨을 사용하였다. 2011년 1월부터 2015년 12월까지 최근 국내 497개 정수장의 pH는 최소 5.8, 최대 8.5, 평균 7.2로 나타났으며 시험에 사용된 시험수는 pH 5.8 ± 0.1 , pH 7.0 ± 0.1 , pH 8.5 ± 0.1 로 사용하였다. 경도는 우리나라 위생안전기준시험법의 경도 농도인 $45 \pm 5 \text{ mg/L}$ as CaCO_3 로 염화칼슘용액을 이용하였다. 알칼리도는 우리나라 위생안전기준의 알칼리도를 맞추기 위해 탄산수소나트륨을 이용해 $35 \pm 5 \text{ mg/L}$ 로 설정하였다. 하지만 시험조건상 pH를 변화시키기 때문에 정제수에 탄산수소나트륨용액(0.04M)을 22.5 mL을 넣고 최종부피를 1 L로 맞추었다. 잔류염소는 우리나라 위생안전기준시험법의 잔류염소 농도인 $1.1 \pm 0.1 \text{ mg/L}$ 로 차아염소산 나트륨(NaOCl)용액을 이용하였다.

2.3 상수도관 컨디셔닝 및 용출

컨디셔닝은 우리나라 위생안전기준 일반수도용 자재 및 급수설비 시험방법에 따라 진행하였다(Table 3). 본 연구에서 진행되는 정수시험의 경우 45°C 이하에서 변형이 없고 무독성인 파라핀 필름을 사용하여 밀봉하였다.

Table 3. Procedures of Heavy Metals Leaching Test for Water Supply Pipes and Pipe Fittings in Korea (Ministry of Environment, 2015)

Steps	Times	Procedures
Washing	Starting day(Mon.), 09:00	Tap water 1 hour & Distilled water 3 times
	Starting day(Mon.), 17:00	Injecting leaching water/ Keeping 24 hours
Conditioning	Day 1(Tue.), 17:00	① Replacing leaching water/ Keeping 24 hours
	Day 2(Wed.), 17:00	② Replacing leaching water/ Keeping 24 hours
	Day 3(Thu.), 17:00	③ Replacing leaching water/ Keeping 24 hours
	Day 4(Fri.), 17:00	④ Replacing leaching water/ Keeping 24 hours
	Day 7(Mon.), 17:00	⑤ Replacing leaching water/ Keeping 24 hours
	Day 8(Tue.), 17:00	⑥ Replacing leaching water/ Keeping 24 hours
	Day 9(Wed.), 17:00	⑦ Replacing leaching water/ Keeping 24 hours
	Day 10(Thu.), 17:00	⑧ Replacing leaching water/ Keeping 24 hours
	Day 11(Fri.), 17:00	⑨ Replacing leaching water/ Keeping 24 hours
	Leaching	Day 14(Mon.), 17:00
Day 15(Tue.), 09:00		Leaching water sampling/ Analysis

Table 4. The Analysis Conditions of ICP (iCAP 7400 Duo) Used in This Study

Flow parameter (L/min)	Plasma Flow	14
	Auxiliary Flow	0.70
Nebulizer gas (kPa)	180	
Sample uptake delay (s)	40	
Power (W)	1350	
pump rate (rpm)	50	
Instrument stabilization delay (s)	5	
Rinse time (s)	30	
Replicates	3	
Replicate read time (s)	20	

2.4 중금속 분석

고농도의 시료를 대비하여 간섭의 영향을 파악하기 용이한 ICP-OES를 1차 분석법으로 사용하였다. ICP-OES 분석의 경우, 중금속의 1차적인 분석으로 Thermo사의 iCAP 7400 Duo를 사용하였으

Table 5. The Analysis Conditions of ICP-MS (iCAP-Q) Used in This Study

Flow parameter (L/min)	Plasma Flow	14
	Auxiliary Flow	0.8
	Sheath gas	-
	Nebulizer gas	1.11
Torch alignment (mm) sampling depth	5	
RF Power (W)	1200	
Pump rate (rpm)	40	
Stabilization delay (sec)	5	

며 기기의 분석조건은 Table 4에 나타내었다. ICP-MS의 경우, 중금속의 2차적인 분석으로 Thermo사의 iCAP-Q를 사용하였으며 기기의 분석조건은 Table 5에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 pH에 따른 스테인레스(STS) 관의 용출특성

스테인레스(STS) 채질 관에서 Cr, Cu, Fe이 검출되었고, pH 5.8, pH 7.0, pH 8.5의 3가지 조건 중 pH가 낮아질수록 중금속이 많이 용출되는 경향을 보였다(Figs. 1~3, Table 6).

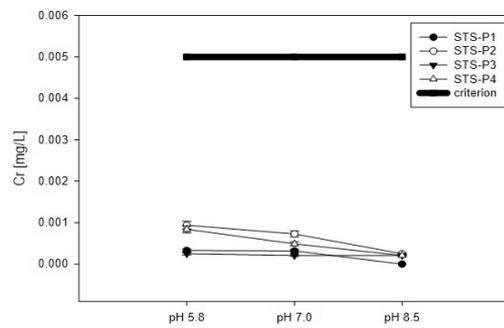
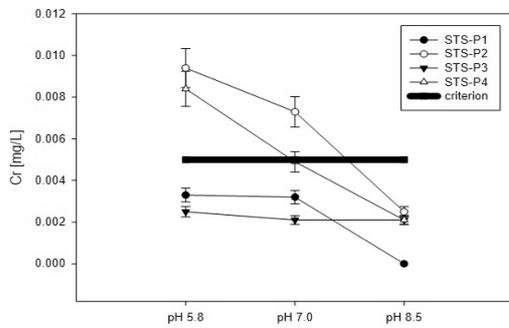


Fig. 1. Chromium (Cr) Leaching at Different pH Values from Different Stainless Pipes (left), and Their Corresponding Results After Applying Normalization Factor (right)

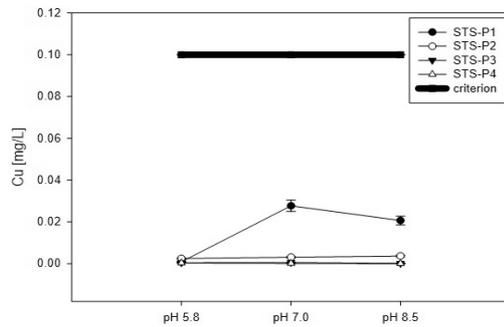
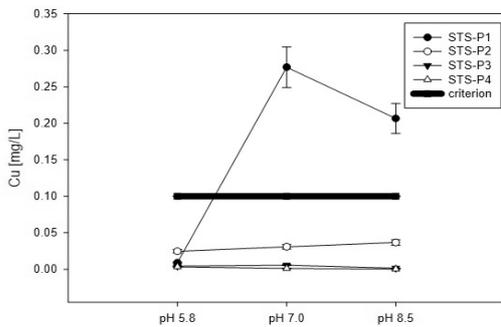


Fig. 2. Copper(Cu) Leaching at Different pH Values from Different Stainless Pipe (left), and Their Corresponding Results After Applying Normalization Factor (right)

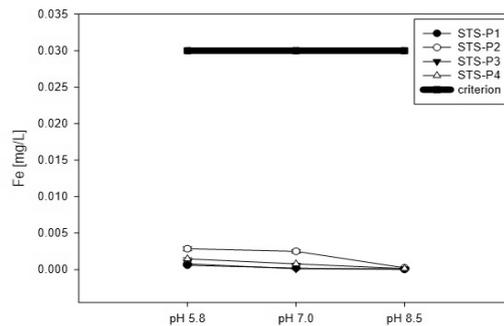
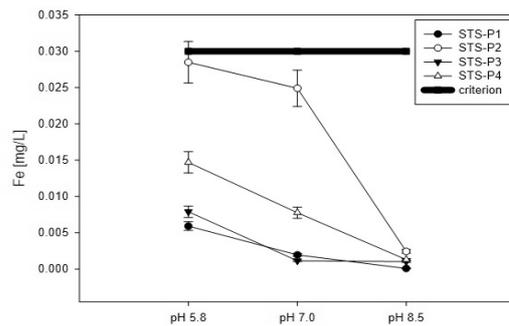


Fig. 3. Iron (Fe) Leaching at Different pH Values from Different Stainless Pipe (left), and Their Corresponding Results After Applying Normalization Factor (right)

Table 6. Heavy Metals Leaching from Stainless Pipes [mg/L]

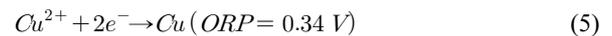
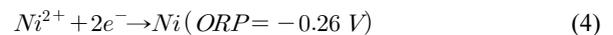
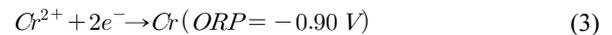
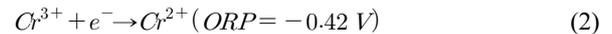
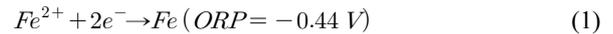
No.	Leaching factors	pH		
		5.8	7.0	8.5
STS-P1	Cr	0.0033	0.0032	0.0000
STS-P2		0.0094	0.0073	0.0025
STS P3		0.0025	0.0021	0.0021
STS-P4		0.0084	0.0049	0.0021
Criterion (Cr ⁶⁺)		0.005		
STS-P1	Cu	0.0091	0.2769	0.2067
STS-P2		0.0247	0.0307	0.0366
STS P3		0.0043	0.0055	0.0015
STS-P4		0.0033	0.0011	0.0002
Criterion		0.1		
STS-P1	Fe	0.0059	0.0020	0.0001
STS-P2		0.0285	0.0249	0.0024
STS P3		0.0079	0.0011	0.0010
STS-P4		0.0147	0.0078	0.0013
Criterion		0.03		
STS-P1	Cd	N.D.*	N.D.	N.D.
STS-P2		N.D.	N.D.	N.D.
STS P3		N.D.	N.D.	N.D.
STS-P4		N.D.	N.D.	N.D.
Criterion		0.0005		
STS-P1	Pb	N.D.	N.D.	N.D.
STS-P2		N.D.	N.D.	N.D.
STS P3		N.D.	N.D.	N.D.
STS-P4		N.D.	N.D.	N.D.
Criterion		0.001		
STS-P1	Zn	0.0046	0.0028	0.0018
STS-P2		0.0054	0.0035	0.0043
STS P3		0.0039	0.0021	N.D.
STS-P4		0.0052	0.0030	0.0011
Criterion		0.3		
STS-P1	Hg	N.D.	N.D.	N.D.
STS-P2		N.D.	N.D.	N.D.
STS P3		N.D.	N.D.	N.D.
STS-P4		N.D.	N.D.	N.D.
Criterion		0.0001		
STS-P1	Se	N.D.	N.D.	N.D.
STS-P2		N.D.	N.D.	N.D.
STS P3		N.D.	N.D.	N.D.
STS-P4		N.D.	N.D.	N.D.
Criterion		0.001		
STS-P1	As	N.D.	N.D.	N.D.
STS-P2		N.D.	N.D.	N.D.
STS P3		N.D.	N.D.	N.D.
STS-P4		N.D.	N.D.	N.D.
Criterion		0.001		

*Not detected

Cr의 경우 시료 STS-P2와 STS-P4가 pH 5.8과 pH 7.0에서 검출되었으며 금속 Cr의 pH 전위도표(Lee, 2000)와 비교했을 때 pH 5.8에서 산화환원전위가 1.0 V 이상일 때와, pH 7.0에서 산화환원전위가 0.5 V 이상일 때 독성이 강한 Cr⁶⁺로 존재하는 것으로 예상된다. 산화환원전위는 상황에 따라 변화하며, 전위가 1.0 V 이상일 때 Cr⁶⁺으로 존재 할 가능성이 높아지게 된다. 이에 상수도관의 산화환원전위에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

Cu의 경우 시험대상시료의 대부분에서는 검출되지 않았지만, 시료 STS-P1에서 검출되었다. Cu의 pH 전위도표와 비교했을 때 pH 8~10사이에서 Cu₂O와 Cu(OH)₂의 형태로 부동태를 형성하게 되고 수소이온농도가 낮아질수록 용출되는 경향을 보일 것으로 예상하였으나 pH 5.8에서는 Cu가 검출되지 않았다.

STS-P1의 Cu결과에 대해 크게 2가지 추론이 가능하다. 첫째, 부동태의 정의에 의해 입의의 금속이 어떤 환경에서 열역학적으로 는 부식에 대한 자유에너지 감소가 대단히 크더라도, 실제로 부식속도가 느리면 부동태 상태일 가능성이 존재한다. 둘째, 스테인레스의 주성분은 Fe, Cr, Ni이며, Fe, Cr, Ni 모두 Cu보다 강한 산화 경향을 보이며, 성분 농도 사이의 관계식인 Nernst 식을 적용하면 Cu의 용출(산화)반응보다 Fe, Cr, Ni의 용출(산화)반응이 앞서 진행된 것으로 예상할 수 있다. Fe, Cr, Ni, Cu의 표준산화환원전위 값은 Eqs. (1)-(5)에 나타내었다.



Fe는 pH 전위도표와 비교했을 때 수소이온농도(pH)의 변화에 상관없이 산화환원전위만 부합하면 Fe²⁺로 용출(산화)하는 것을 알 수 있다. 또한 수소이온농도(pH)가 낮아질수록 용출(산화)이 될 가능성은 높아진다.

스테인레스(STS) 재질 관의 결과 중 Cd, Pb, Hg, Se, As는 pH 5.8, pH 7.0, pH 8.5의 3가지 조건에서 모두 검출되지 않았으며 해당 결과는 Table 6에 나타내었다. Zn의 경우 미량 검출되었지만 위생안전 기준치보다 하회하였다.

Table 7. Heavy Metals Leaching from Copper Pipes [mg/L]

No.	Leaching factors	pH		
		5.8	7.0	8.5
CU-P1	Cu	2.5326	0.9994	0.3665
CU-P2		4.4990	0.9895	0.3705
CU-P3		3.6874	0.9970	0.5086
Criterion		0.1		
CU-P1	Cd	N.D.*	N.D.	N.D.
CU-P2		N.D.	N.D.	N.D.
CU-P3		N.D.	N.D.	N.D.
Criterion		0.0005		
CU-P1	Pb	N.D.	N.D.	N.D.
CU-P2		N.D.	N.D.	N.D.
CU-P3		N.D.	N.D.	N.D.
Criterion		0.001		
CU-P1	Cr	N.D.	N.D.	N.D.
CU-P2		N.D.	N.D.	N.D.
CU-P3		N.D.	N.D.	N.D.
Criterion (Cr ⁶⁺)		0.005		
CU-P1	Fe	N.D.	N.D.	N.D.
CU-P2		0.0014	N.D.	N.D.
CU-P3		N.D.	N.D.	N.D.
Criterion		0.03		
CU-P1	Zn	0.0029	0.0018	0.0010
CU-P2		0.0068	0.0027	0.0012
CU-P3		0.0034	0.0018	0.0013
Criterion		0.3		
CU-P1	Hg	N.D.	N.D.	N.D.
CU-P2		N.D.	N.D.	N.D.
CU-P3		N.D.	N.D.	N.D.
Criterion		0.0001		
CU-P1	Se	N.D.	N.D.	N.D.
CU-P2		N.D.	N.D.	N.D.
CU-P3		N.D.	N.D.	N.D.
Criterion		0.001		
CU-P1	As	N.D.	N.D.	N.D.
CU-P2		N.D.	N.D.	N.D.
CU-P3		N.D.	N.D.	N.D.
Criterion		0.001		

*Not detected

3.2 pH에 따른 구리(Cu) 관의 용출특성

구리(Cu) 재질 관의 결과 중 Cu가 상당량 검출되었고, pH가 낮아질수록 중금속이 많이 용출되는 경향을 보였다(Table 7).

Cu의 경우 pH 5.8, pH 7.0에서 기준치를 상회하는 결과를

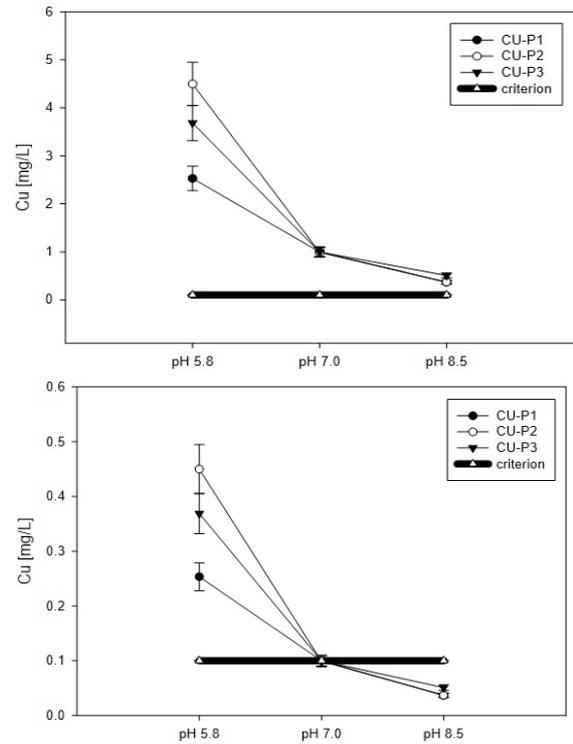


Fig. 4. Copper (Cu) Leaching at Different pH Values from Different Copper Pipe (left), and Their Corresponding Results After Applying Normalization Factor (right)

얻었으며, 수소이온농도(pH)가 낮아질수록 용출(산화)되는 경향을 보였다. pH 전위도표와 비교하였을 때 수소이온농도(pH) 8~10 사이에서 Cu_2O 와 $Cu(OH)_2$ 형태의 부동태가 형성하게 되는 것을 예상할 수 있었다. 또한, pH 5.8의 경우 급수관의 보정치인 '0.1'을 적용하여도 높은 수치를 나타내었다(Fig. 4).

구리(Cu) 재질 관의 결과 중 Cd, Pb, Cr, Fe, Hg, Se, As는 pH 5.8, pH 7.0, pH 8.5 조건에서 모두 검출되지 않았으며 Zn의 경우 미량 검출되었지만 위생안전 기준치보다 하회하였다.

3.3 pH에 따른 스테인레스(STS) 이음관의 용출특성

스테인레스(STS) 재질 이음관의 결과 중 Cd, Pb, Cr, Hg, Se, As는 pH 5.8, pH 7.0, pH 8.5 모두에서 검출되지 않았다(Table 8). Fe, Cu, Zn의 경우 미량 검출되었고 pH가 낮아질수록 그 수치가 높아지는 경향을 보였다. 하지만 위생안전 기준치보다는 하회하였다.

3.4 pH에 따른 구리(Cu) 이음관의 용출특성

구리(Cu) 재질 이음관 중 시료 CU-E4에서 Cd, Pb, Cu, Zn이 검출되었고, pH가 낮아질수록 중금속이 많이 용출되는 경향을 보였다(Figs. 5~8, Table 9).

Table 8. Heavy Metals Leaching from Stainless Fitting Pipes [mg/L]

No.	Leaching factors	pH		
		5.8	7.0	8.5
STS-E1	Cd	N.D.*	N.D.	N.D.
STS-E2		N.D.	N.D.	N.D.
STS-E3		N.D.	N.D.	N.D.
Criterion		0.0005		
STS-E1	Pb	N.D.	N.D.	N.D.
STS-E2		N.D.	N.D.	N.D.
STS-E3		N.D.	N.D.	N.D.
Criterion		0.001		
STS-E1	Cr	N.D.	N.D.	N.D.
STS-E2		N.D.	N.D.	N.D.
STS-E3		N.D.	N.D.	N.D.
Criterion (Cr ⁶⁺)		0.005		
STS-E1	Fe	N.D.	N.D.	N.D.
STS-E2		N.D.	N.D.	N.D.
STS-E3		0.0010	N.D.	0.0014
Criterion		0.03		
STS-E1	Cu	0.0149	0.0104	0.0073
STS-E2		0.0223	0.0152	0.0066
STS-E3		0.0077	0.0051	0.0033
Criterion		0.1		
STS-E1	Zn	0.0113	0.0028	0.0038
STS-E2		0.0106	0.0094	0.0048
STS-E3		0.0101	0.0052	0.0066
Criterion		0.3		
STS-E1	Hg	N.D.	N.D.	N.D.
STS-E2		N.D.	N.D.	N.D.
STS-E3		N.D.	N.D.	N.D.
Criterion		0.0001		
STS-E1	Se	N.D.	N.D.	N.D.
STS-E2		N.D.	N.D.	N.D.
STS-E3		N.D.	N.D.	N.D.
Criterion		0.001		
STS-E1	As	N.D.	N.D.	N.D.
STS-E2		N.D.	N.D.	N.D.
STS-E3		N.D.	N.D.	N.D.
Criterion		0.001		

*Not detected

Cr, Hg, Se, As의 경우에는 pH 5.8, pH 7.0, pH 8.5에서 모두 검출되지 않았으며 Fe의 경우 미량 검출되었지만 위생안전 기준치보다 하회하였다.

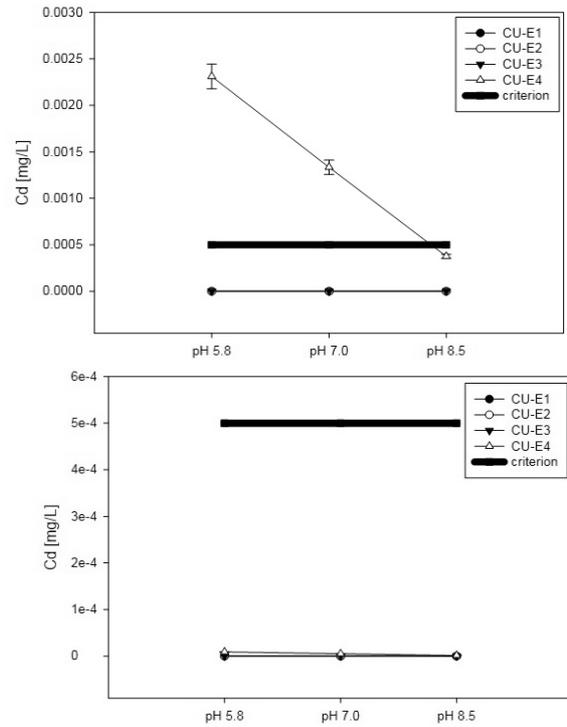


Fig. 5. Cadmium (Cd) Leaching at Different pH Values from Different Copper Pipe Fitting (left), and Their Corresponding Results After Applying Normalization Factor (right)

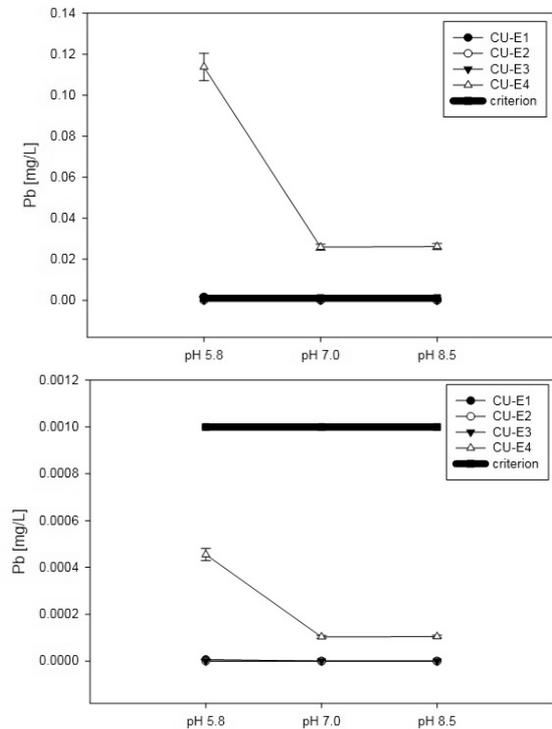


Fig. 6. Lead (Pb) Leaching at Different pH Values from Different Copper Pipe Fitting (left), and Their Corresponding Results After Applying Normalization Factor (right)

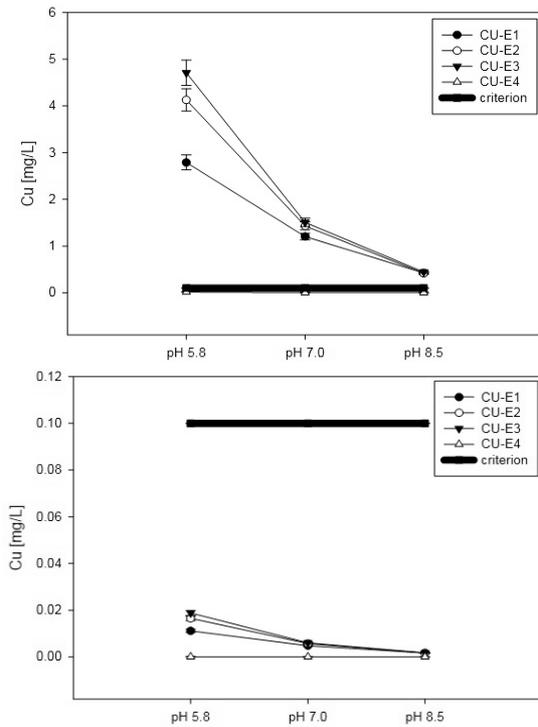


Fig. 7. Copper (Cu) Leaching at Different pH Values from Different Copper Pipe Fitting (left), and Their Corresponding Results After Applying Normalization Factor (right)

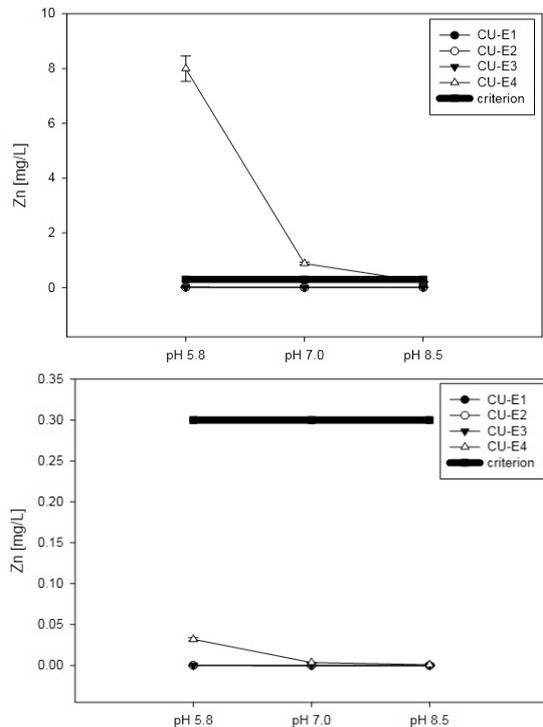


Fig. 8. Zinc (Zn) Leaching at Different pH Values from Different Copper Pipe Fitting (left), and Their Corresponding Results After Applying Normalization Factor (right)

Table 9. Heavy Metals Leaching from Copper Fitting Pipes [mg/L]

No.	Leaching factors	pH		
		5.8	7.0	8.5
CU-E1	Cd	N.D.*	N.D.	N.D.
CU-E2		N.D.	N.D.	N.D.
CU-E3		N.D.	N.D.	N.D.
CU-E4		0.0023	0.0013	N.D.
Criterion		0.0005		
CU-E1	Pb	0.0017	N.D.	N.D.
CU-E2		N.D.	N.D.	N.D.
CU-E3		N.D.	N.D.	N.D.
CU-E4		0.1138	0.0259	0.0262
Criterion		0.001		
CU-E1	Cu	2.7924	1.2035	0.4245
CU-E2		4.1304	1.4320	0.4174
CU-E3		4.7116	1.5088	0.4439
CU-E4		0.0135	0.0019	0.0027
Criterion		0.1		
CU-E1	Zn	0.0119	0.0040	0.0021
CU-E2		0.0113	0.0034	0.0086
CU-E3		0.0139	0.0045	0.0103
CU-E4		7.9972	0.8808	0.2197
Criterion		0.3		
CU-E1	Cr	N.D.	N.D.	N.D.
CU-E2		N.D.	N.D.	N.D.
CU-E3		N.D.	N.D.	N.D.
CU-E4		N.D.	N.D.	N.D.
Criterion (Cr ⁶⁺)		0.005		
CU-E1	Fe	0.0016	0.0012	N.D.
CU-E2		N.D.	N.D.	N.D.
CU-E3		N.D.	N.D.	N.D.
CU-E4		N.D.	N.D.	N.D.
Criterion		0.03		
CU-E1	Hg	N.D.	N.D.	N.D.
CU-E2		N.D.	N.D.	N.D.
CU-E3		N.D.	N.D.	N.D.
CU-E4		N.D.	N.D.	N.D.
Criterion		0.0001		
CU-E1	Se	N.D.	N.D.	N.D.
CU-E2		N.D.	N.D.	N.D.
CU-E3		N.D.	N.D.	N.D.
CU-E4		N.D.	N.D.	N.D.
Criterion		0.005		
CU-E1	As	N.D.	N.D.	N.D.
CU-E2		N.D.	N.D.	N.D.
CU-E3		N.D.	N.D.	N.D.
CU-E4		N.D.	N.D.	N.D.
Criterion		0.005		

*Not detected

Table 10. Heavy Metals Leaching from Zinc Fitting Pipes [mg/L]

No.	Leaching factors	pH		
		5.8	7.0	8.5
ZN-E1	Zn	5.8245	0.3028	0.2668
ZN-E2		5.4481	1.3067	0.3557
Criterion		0.3		
ZN-E1	Cd	N.D.*	N.D.	N.D.
ZN-E2		N.D.	N.D.	N.D.
Criterion		0.0005		
ZN-E1	Pb	N.D.	N.D.	N.D.
ZN-E2		N.D.	N.D.	N.D.
Criterion		0.001		
ZN-E1	Cr	N.D.	N.D.	N.D.
ZN-E2		N.D.	N.D.	N.D.
Criterion (Cr ⁶⁺)		0.005		
ZN-E1	Fe	N.D.	N.D.	N.D.
ZN-E2		N.D.	N.D.	N.D.
Criterion		0.03		
ZN-E1	Cu	N.D.	N.D.	N.D.
ZN-E2		N.D.	N.D.	N.D.
Criterion		0.1		
ZN-E1	Hg	N.D.	N.D.	N.D.
ZN-E2		N.D.	N.D.	N.D.
Criterion		0.0001		
ZN-E1	Se	N.D.	N.D.	N.D.
ZN-E2		N.D.	N.D.	N.D.
Criterion		0.001		
ZN-E1	As	N.D.	N.D.	N.D.
ZN-E2		N.D.	N.D.	N.D.
Criterion		0.001		

*Not detected

3.5 pH에 따른 아연도금(Zn) 이음관의 용출특성

아연(Zn) 재질 이음관에서는 pH가 낮아질수록 중금속이 많이 용출되는 경향을 보였으며, Zn이 검출되었다(Table 10). Zn의 pH 전위도표와 비교하였을 때 pH 8.0~11.5에서 Zn(OH)₂의 부동태를 형성하며 pH 7.0 이하에서 기준치를 상회하는 결과를 얻었지만, 급수 이음관의 보정치인 '0.004'를 적용하게 되면 기준치 이내로 계산된다(Fig. 9).

아연(Zn) 재질 이음관의 결과 중 Cd, Pb, Cr, Fe, Cu, Hg, Se, As는 pH 5.8, pH 7.0, pH 8.5의 3가지 조건에서 모두 검출되지 않았다.

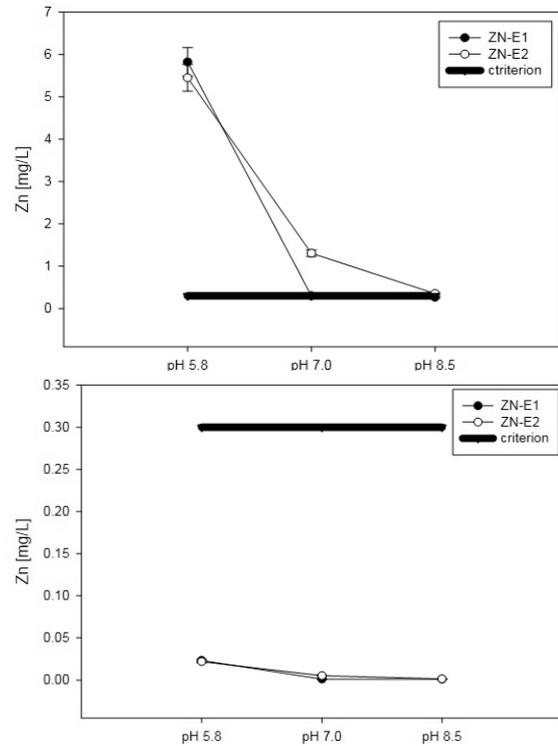


Fig. 9. Zinc (Zn) Leaching at Different pH Values from Different Zinc Pipe Fitting (left), and Their Corresponding Results After Applying Normalization Factor (right)

4. 결론

본 연구의 주요 결과로 관 재질과 상관없이 pH가 낮아질수록 중금속의 용출 정도가 커지는 경향이 있으며, 구리관의 경우 Cu가 pH 5.8의 약산성상태에서 위생안전기준을 상회하는 것을 확인하였다. 스테인레스 재질에서 Cu의 경우 pH 5.8에서 용출농도가 감소하였고 이는 Cu보다 산화도가 큰 Fe, Cr, Ni이 대신 산화된 것으로 추정되며 상수도관과 산화환원전위에 대한 추가 연구가 필요하다. 구리재질의 Cu를 제외하고 나머지 중금속 중 기준치를 상회하는 항목들이 존재하였으나 현행 수도법상의 보정계수(급수관 : 0.1, 급수이음관 : 0.004)를 적용하면 기준치 이내인 것을 확인할 수 있었다. 위 결과를 통해 수도물이 낮은 pH로 상수도관을 통과하면 중금속 용출이 증가함을 예상할 수 있다. 국내 수도물의 pH 현황 고려 시 현행 위생안전시험법에서 pH 7.0만으로 시험을 진행하는 것은 상수도관 위해성평가에 한계가 있다고 판단된다. 이외의 재질에 대해서는 스테인레스 재질의 관에서 Cr, Cu가, 구리재질의 이음관에서 Cd, Pb, Cu, Zn이, 아연재질의 이음관에서 Zn이 보정계수 적용 전 위생안전기준치를 상회하였지만 보정계수 적용 후 기준치를 만족하는 결과를 얻었다. 우리나라 위생안전기준의 보정계수는 일본의 규격(JIS 3200-7) 값을 그대로 들여 온 것으로

상수도관의 보정계수에 대한 국내 실정과 국민신뢰 안전성에 맞는 추가연구가 필요하다. 또한 본 연구에서는 스테인레스, 구리, 아연 재질만으로 연구를 진행하였기에 상수도관으로 사용되는 에나멜 코팅 도복장강관, 액상에폭시 도복장강관, 주철관, 닥타일주철관, PVC관, PE관 등에 관한 추가연구가 필요하다. 본 연구를 통해서 기존의 위생안전시험법이 실제 상수도 pH 조건에서 관내 중금속용출을 시험하는 방법으로 개선 필요성이 제시되었고, 해당 결과들은 우리나라 위생안전기준의 개정연구에 유용한 기초자료로 활용될 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0030040).

References

- Lee, H. Y. (2000). *Corrosion of Metals*, Youn-Kyoung Culture history, Seoul (in Korean).
- Ministry of Environment, Korea (2007). *Hygienic Safety Standards, Conformity Assessment System of Water Works Materials Research Report*, No. 187169 (in Korean).
- Ministry of Environment, Korea (2014). *Hygienic Safety Standards Testing Process Improvement Methods* (in Korean).
- Ministry of Environment, Korea (2015). *Water Supply Materials and Products of Hygienic Safety Standards Testing Process Methods* (in Korean).
- Ministry of Government Legislation (2011). *Water Supply Materials and Products of Hygienic Safety Standard Act*. No. 413, 25. May, Ministry of Environment, Korea (in Korean).
- NSF (2015). *Drinking Water System Components—Health Effects*, NSF/ANSI 61.
- Water Supply and Sewerage Policy Division (2014). *Water Supply Statistics 2013*. No. 5585236. Ministry of Environment, Korea (in Korean).
- World Health Organization (WHO) (2011). *Guideline for Drinking-Water Quality 4th edition*.