

## A Method of Evaluating and Controlling Corrosion Rate for Prevention of Water Quality Problems in Multiple Water Source

Sung Hoon Shin<sup>#</sup>, Jong Tai Jung<sup>+</sup>

Department of Civil and Environmental Engineering, Incheon National University, 119 Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon, Korea

### Abstract

In this study, we evaluated the impact on the contamination accident of water quality due to a pipe corrosion problem when using surface water and treated sewage water by the water blending method, and developed a controlling method. As result of experiment, carbon steel was rapidly corroded 14.7%~30.9% more than cast iron in surface water, treated sewage water, and surface water blended with treated sewage water. When injecting dissolved CO<sub>2</sub> liquid slaked lime for corrosion control, corrosion reduction effect was found to be 39.15% for CaCO<sub>3</sub> 30mg/L and 54.7% for CaCO<sub>3</sub> 60mg/L compared to CaCO<sub>3</sub> 0mg/L. Both corrosion speed and corrosion degree increase with stirring speed. The Shannon Index was relatively low in blended water sample than either surface water or treated sewage water. While microorganism *Betaproteobacteria* became dominants in cast iron and PE, but microorganism did not become dominants in carbon steel.

**Key words:** corrosion, water blending, Microbiologically Induced Corrosion (MIC), corrosion rate, lime milk

### 1. 서론

최근 전 세계적으로 기후변화에 따른 가뭄으로 인해 거대한 경제적 타격을 동반한 극심한 피해가 발생되고 있다. 또한, 우리나라의 경우도 지역에 따라 2~3년마다 크고 작은 가뭄이 발생하며, 7년 주기의 극한 가뭄이 발생하는 추세이다.

기후변화에 따른 가뭄 즉, 물 부족상황에서 부족한 수자원을 해결하기 위한 방안으로 지표수 중심에서 하수처리수, 해수담수화, 지하수, 빗물 등의 대체수자원을 지표수와 Water Blending 하여 필요한 용수를 공급

하는 방안이 논의되고 있다(Dietz, *et. al.*, 2002; Taylor, *et. al.*, 2003). 그러나 다양한 수자원을 Water Blending하여 공급함에 따라서 관의 부식에 대한 심층 연구가 아직 이루어지지 않고 있다.

상수도의 배급수관망 부식의 문제는 가정 급수전에 적수 및 맛·냄새 등을 유발하고 납, 구리 등 중금속이 용출될 수 있으며, 상수도 시설물에 대해서도 막대한 손실을 가져오게 된다(Edwards, 2002; Rushing, *et. al.*, 2003).

주요 공업국의 부식에 의한 경제적인 손실은 GNP의 1~6%에 달하는 것으로 보고되고 있지만, 국내의 경우

<sup>#</sup> The 1st author: Sung Hoon Shin, Tel. +82-32-835-4139, e-mail, [hoony2002kr@naver.com](mailto:hoony2002kr@naver.com)

<sup>+</sup> Corresponding author: Jong Tai Jung, Tel. +82-32-835-4139, e-mail, [jtjung@inu.ac.kr](mailto:jtjung@inu.ac.kr)

부식 문제에 대한 구체적인 해결방안은 거의 없는 실정이다.

외국의 경우에도 공급하는 수자원의 변경 및 Water Blending 따른 관 부식 및 수질 문제가 대두되고 있다. 미국의 경우 탐파, 플로리다, 캘리포니아 지역에서 공급하는 수자원 즉 기존에 지하수 대신 지표수로의 대체하면서 심각한 적수가 발생되었고(Reiber, *et. al.*, 1997; Brodeur, *et. al.*, 2006; Tang, *et. al.*, 2006), 2008년 중국에서도 기존에 사용하는 지역 인근의 수자원의 80%를 외부에서 물을 대체하면서 심각한 적수가 발생되었다(Yang, 2012).

관의 부식은 pH, 알칼리도, 용존산소, 염소이온 등 다양한 수질인자와 미생물 부식(microbiologically inducedcorrosio; MIC) 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Kwak, *et. al.*, 2001; Javed, *et. al.*, 2014; Pillay & Lin, 2014).

따라서 본 연구는 농업용수 이용 시 다중수원인 지표수와 하수처리수를 동시에 Water Blending 하여 관 부식에 미치는 영향, 알칼리도 변화에 따른 관 부식 제어 효율성 평가 및 미생물이 부식에 미치는 영향을 분석하므로 기존에 단일수원 중심에서 다중수원의 물을 공급함에 따른 관 부식영향에 대한 평가 및 안정적인 물 공급의 가능성을 평가하고자 한다.

## II. 실험 내용 및 방법

### 1. 실험 시편

본 실험은 Batch Reactor로 단기간에 부식도를 파악하기 위하여 주철관, 탄소강관, PE관 시편을 이용하여 실험을 진행하였다. 시편의 크기는  $1.3 \times 7.5 \times 0.17$  cm, 표면적  $24.15 \text{ cm}^2$ 의 것을 사용하였고, 부식 실험은 무게감량법으로 ASTM G-31, NACE standard TM0169의 방법을 참고하여 실험하였다.

시편의 전처리는 초음파세척기에서 5분 동안 에탄올을 사용하여 세척하고,  $80^\circ\text{C}$  drying oven에서 30분간 건조한 후 데시케이터에 넣어 보관하였다. 시편의 후처리는 시편의 표면에 부착된 부식생성물의 제거를 위해 세정액(황산:물=1:4)에 15초간 3회 세척한 후, 5분간 초음파 세척하여 수분을 제거하고,  $80^\circ\text{C}$  drying oven에서 30분간 건조시킨 후 무게를 측정하였다.

### 2. 실험 장치

Batch 실험의 경우, <Figure 1>과 같이 구성하여 다양한 지표수와 하수처리수의 Water Blending에 따른 부식실험을 진행하였다. 2,000 mL 비이커에 시편을 침전시켜 시간에 따른 단기간의 부식진행사항을 관찰하였다. 지표수와 하수처리수의 Water Blending 비율은 100:0, 50:50, 0:100으로 하였으며,  $\text{CaCO}_3$  주입농도는 0, 30, 60 mg/L 고정하였고, 실험에 사용된 지표수

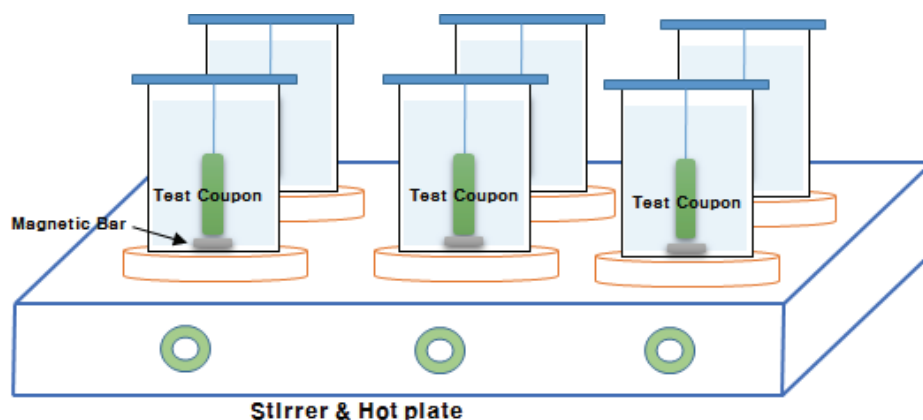


Figure 1. Batch reactor diagram

Table 1. Characteristics of raw water

Water Quality	Surface water	Treated sewage water
TOC (mg/L)	1,6	2,8
pH	7,2	6,8
EC( $\mu$ S/cm)	204,0	709
Temperature (°C)	20	20

는 P취수장, 하수처리수는 K하수처리장의 방류수를 채수하여 이용하였다. 교반강도는 0, 100, 150, 200 rpm으로 변화를 주어 교반시키고, 부식도 측정이 가능한 시편을 고안된 장치에 부착하여 실험하였다. 수온은 20 °C를 유지하여 진행하였다.

초기 실험에 사용된 지표수와 하수처리수의 수질은 아래 <Table 1> 과 같다.

### 3. 분석방법

pH와 수온은 pH 및 온도meter(ORION Model 230A, USA)로 측정하였고, TOC는 Shimadzu TOC-5000, 전기전도도는 Conductivity meter(WTW LF191)를 이용하여 수질을 분석하였다.

미생물 동정을 위한 시료채취는 실험 15일 후에 진행하였으며, 주철, 탄소강, PE 시편에 부착되어 있는 Biofilm을 채취하여, 분석 전까지 0 °C에서 보관하였다. 채취된 Biofilm으로부터 Fast DNA SPIN Kit for soil(MP Biomedicals, Solon, OH, USA)를 사용하여 community DNA를 추출 하였다. DNA 추출 과정은 제조사의 protocol을 따랐고, 추출된 DNA는 TE buffer (20mM Tris-HCl, 1mM EDTA [pH 8.0])에 용해시켜

다음 분석 전까지 -20 °C에 보관하였다. 이후에 PCR을 이용하여 추출된 community DNA를 주형으로 16S rRNA 유전자를 증폭하여 미생물을 분석하였다.

## III. 실험결과 및 고찰

### 1. Water Blending 변화에 따른 부식도 평가

<Figure 2>는 지표수(SW), 하수처리수(TSW), 지표수 + 하수처리수(SW + TSW)를 Water Blending하여 시간에 따른 주철과 탄소강 시편의 부식도를 나타낸 것이다.

전체적으로 주철보다 탄소강이 부식도가 빠르게 진행되었으며, 하수처리수의 Water Blending 비율이 증가할수록 부식도가 높게 나타났다. 탄소강은 주철에 비해 하수처리수가 100%인 경우 14.7%, 하수처리수와 지표수가 50%:50%인 경우 26%, 지표수가 100%인 경우 30.9% 부식도가 높게 나타났다.

여기서 주철은 실험기간 35일 기준으로 하수처리수:지표수 비율이 100%/0%인 경우 236.1 MDD, 50%:50%인 경우 120.5 MDD, 0%:100%인 경우 81.5 MDD로 나타났으며, 탄소강은 하수처리수:지표수 비율이 100

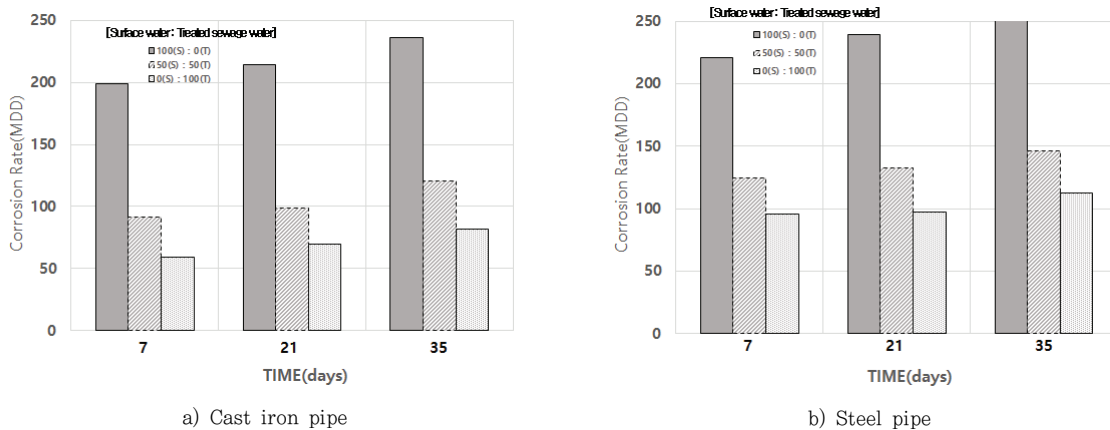


Figure 2. Variation of corrosion rate with water blending

%/0%인 경우 250.8.MDD, 50%:50%인 경우 146.5 MDD, 0%:100%인 경우 112.4 MDD로 나타났다.

결론적으로 하수처리수의 비율이 부식도가 증가되는 이유는, 지표수보다 하수처리수가 이온의 농도가 높고, 이로 인해 전기적 불균형의 해소가 빠르고, 중화가 쉽게 이루어지기 때문에 부식성의 진행을 촉진 시키는 것으로 사료된다.

### 2. 탄산칼슘 주입을 통한 부식도 제어 평가

부식을 제어하기 위해, 탄산가스로 용해시킨 CaCO<sub>3</sub>의 투입량을 0 mg/L, 30 mg/L, 60 mg/L로 주입하여 시간에 따른 부식도 평가를 <Figure 3>에 나타내었다. 본 실험에 사용된 시편은 부식에 가장 취약한 탄소강을 사용하였으며, 지표수 + 하수처리수를 50% : 50% Water Blending을 하여 실험을 수행하였다.

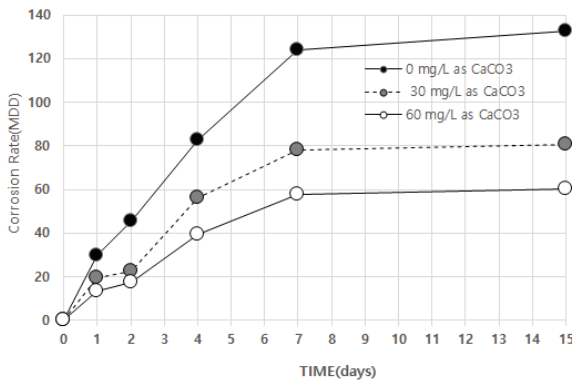


Figure 3. Variation of corrosion rate with CaCO<sub>3</sub>

CaCO<sub>3</sub> 투입량이 높아질수록 부식제어 효과가 높게 나타났으며, 운영기간 7일 이후부터 부식속도가 전체적으로 감소하는 경향을 보였다.

CaCO<sub>3</sub> 30mg/L를 주입한 실험의 기간별 부식도를 보면 19.6, 22.7, 56.1, 77.9, 80.8MDD로 CaCO<sub>3</sub> 0 mg/L의 29.5, 45.7, 82.8, 124.2, 132.9 MDD에 비해 각각 34.1, 50.3, 32.3, 37.2, 39.1%의 부식제어효과를 나타내었다. 평균 38%이상의 부식제어효과가 있는 것으로 나타났다. 또한 CaCO<sub>3</sub> 60 mg/L를 주입한 실험의 기간별 부식도를 보면 13.4, 17.6, 39.3, 57.7, 60.2

MDD로 CaCO<sub>3</sub> 0 mg/L에 비해 각각 54.9, 61.4, 52.5, 53.5, 54.7%의 부식제어효과가 나타나면서 평균 55% 이상의 부식제어효과가 있는 것으로 나타났다.

CaCO<sub>3</sub> 0 mg/L를 기준으로 15일 후 CaCO<sub>3</sub> 30 mg/L는 39.15%, CaCO<sub>3</sub> 60 mg/L는 54.70 %의 부식저감 효과가 있는 것으로 나타났다.

### 3. 교반속도에 따른 부식도 평가

<Figure 4>는 하수처리수와 지표수를 50%:50%로 Water Blending하고, 교반속도 0, 100, 150, 200 rpm으로 다양하게 변화를 주어 시간에 따른 탄소강 시편의 부식도를 평가한 것이다.

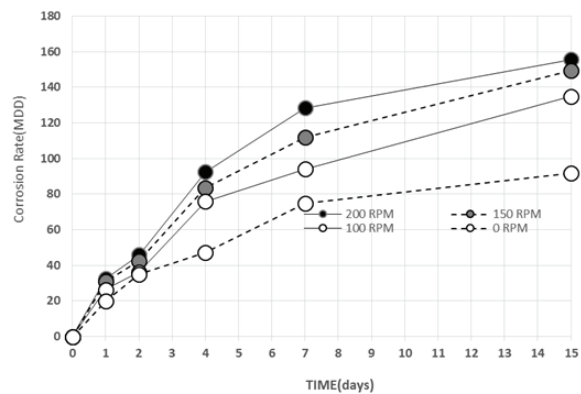


Figure 4. Variation of corrosion rate with mixing intensity

운영기간 15일을 기준으로 0, 100, 150, 200 rpm의 부식도는 각각 92.6, 135.7, 149.3, 155.7 MDD로 나타났으며, 교반속도가 증가할수록 부식속도 및 부식도 증가된 것으로 평가되었다. 또한, 교반을 하지 않은 0rpm을 기준으로 100rpm은 부식도가 46.7%, 150rpm은 62.2%, 200 rpm은 69.4 % 부식도가 상승하였다.

운영 초기에 교반속도에 따른 부식도의 진행률이 점진적으로 일어나다가 4일 이후부터 급속하게 부식도가 증가된 것으로 나타났다.

교반속도가 증가할수록 부식도가 증가하는 이유는 시편 표면에 대한 용존산소가 빠른 확산을 통해 부식속도가 상승하는 것으로 사료된다.

4. 부식에 따른 미생물 분석

〈Table 2〉는 지표수와 하수처리수 Water Blending에 따른 15일 경과 후 각각의 시편별 미생물의 다양성을 나타낸 것이다.

Shannon Index는 원수 지표수와 하수처리수 각각 5.22, 4.51로 상대적으로 지표수에서 미생물의 다양성이 높았다.

15일 경과 후 주철시료에 부착되어 있는 미생물의 Shannon Index는 지표수 100%, 하수처리수 100%, 지표수+하수처리수(50% : 50%)의 시료에서 3.84, 2.61, 3.27, 탄소강의 경우 3.51, 2.59, 5.04, PE의 경우 5.01, 3.04, 4.49로 분석되었으며, 지표수와 하수처리수 단독으로 실험한 시편보다 지표수와 하수처리수를 Water Blending한 시편에서 Shannon Index가 낮게 나타났으며, 지표수와 하수처리수를 Water Blending한 시료에

서 지표수와 하수처리수 각각의 환경에서 적응한 미생물들이 수질환경 변화에 따른 종이 감소된 것으로 판단된다.

〈Figure 5〉는 시편에 부착되어 있는 미생물을 분석하여 미생물의 종류 및 점유율을 나타낸 것이다. 원수 지표수에 서식하는 주요 미생물은 *Sphingobacteriia* 13.14%, *Alphaproteobacteria* 10.48%, *Betaproteobacteria* 56.17%, 하수처리수에는 *Alphaproteobacteria* 26.61%, *Betaproteobacteria* 33.39%를 차지하는 것으로 분석되었다.

15일 경과 후 단독 지표수 주철시료에 부착되어 있는 미생물을 살펴보면, *Alphaproteobacteria* 32.17%, *Betaproteobacteria* 58.06%, 지표수 + 하수처리수는 *Betaproteobacteria* 87.98%, 단독 하수처리수의 경우 *Betaproteobacteria* 83.73%로 분석되었다.

Table 2. Community diversity estimates of the bacteria in SW, TSW, SW + TSW

Samples		OUTs	Diversity indices	
			Shannon	Simpson
Cast Iron Pipe	SW:TSW(100:0%)	114	3.84	0.8265
	SW:TSW(50:50%)	91	2.61	0.5899
	SW:TSW(0:100%)	115	3.27	0.7524
Steel Pipe	SW:TSW(100:0%)	70	3.51	0.7624
	SW:TSW(50:50%)	62	2.59	0.5668
	SW:TSW(0:100%)	61	5.04	0.8974
PE	SW:TSW(100:0%)	82	5.01	0.9474
	SW:TSW(50:50%)	45	3.04	0.9510
	SW:TSW(0:100%)	127	4.49	0.8899
SW		73	5.22	0.9569
TSW		42	4.51	0.9383

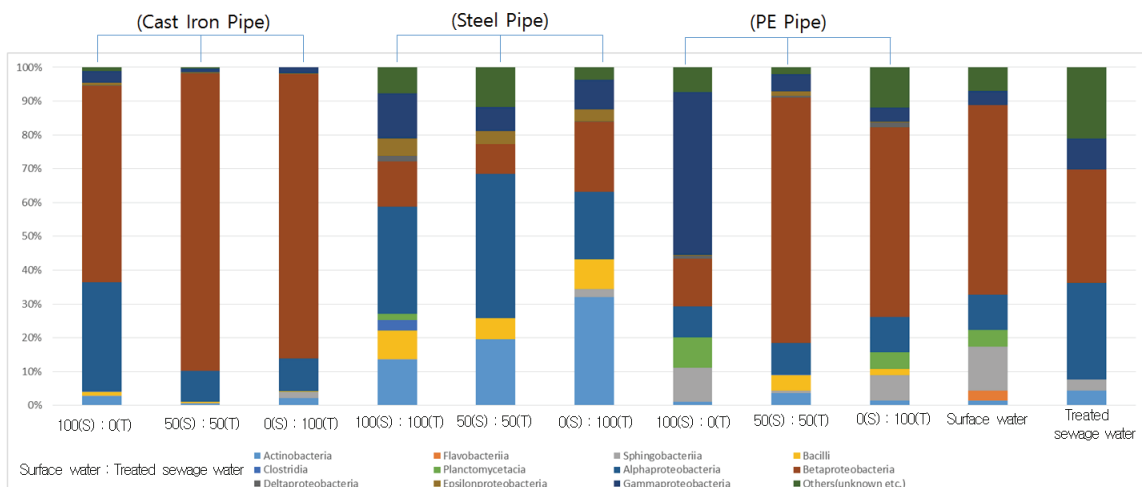


Figure 5. Relative abundance of the major phylotype at class level in SW, TSW, SW + TSW

주철시편의 경우 하수처리수의 양이 증가하면서 *Alphaproteobacteria*의 양이 감소하면서 *Betaproteobacteria*가 우점종화 된 것으로 나타났다.

탄소강 시편에 부착되어 있는 미생물의 경우, 단독 지표수의 경우 *Actinobacteria* 13.45%, *Alphaproteobacteria* 31.75%, *Betaproteobacteria* 13.35%, *Gammaproteobacteria* 13.28%, 지표수 + 하수처리수는 *Actinobacteria* 19.65%, *Alphaproteobacteria* 42.77%, *Gammaproteobacteria* 11.82%, 단독 하수처리수는 *Actinobacteria* 31.93%, *Alphaproteobacteria* 19.97%, *Betaproteobacteria* 20.74%로 분석되었다.

탄소강 시편의 경우 특정 미생물의 독점적인 우점종화는 일어나지 않았으며, 다양하게 분포되어 있는 것으로 나타났다.

PE 시편에 부착되어 있는 미생물의 경우, 단독 지표수의 경우 *Gammaproteobacteria* 48.15%, 지표수+하수처리수는 *Betaproteobacteria* 72.54%, 단독 하수처리수는 *Betaproteobacteria* 56.01%로 분석되었다. PE 시편의 경우, 하수처리수의 양이 증가할수록 *Betaproteobacteria*의 우점종화가 뚜렷하게 일어났다.

일반적으로 *proteobacteria*는 철을 산화시켜 부식을 촉진하는 미생물로 잘 알려져 있으며(Sabrina, 2001), 본 실험에서 *proteobacteria*의 증가는 이를 잘 반영해주는 결과라 할 수 있다.

#### IV. 결론

본 연구는 관망 내 수자원 혼합으로 인한 수질사고를 방지하기 위한 방법 및 부식평가를 하고자 수행되었다.

주철보다 탄소강이 부식도가 빠르게 진행되었으며, 탄소강은 주철에 비해 하수처리수가 100%인 경우 14.7%, 하수처리수와 지표수가 50%:50%인 경우 26%, 지표수가 100%인 경우 30.9% 부식도가 높게 나타났다.

CaCO<sub>3</sub> 투입량이 높아질수록 부식제어 효과가 높게 나타났으며, CaCO<sub>3</sub> 30 mg/L를 주입한 실험의 경우 기간별 평균 38%, CaCO<sub>3</sub> 60 mg/L는 평균 55% 이상의 부식제어 효과를 나타냈으며, CaCO<sub>3</sub> 0 mg/L을 기준으

로 15일 후 CaCO<sub>3</sub> 30 mg/L는 39.15%, CaCO<sub>3</sub> 60 mg/L는 54.70%의 부식저감 효과가 있는 것으로 나타났다.

교반속도가 증가할수록 부식속도 및 부식도가 증가된 것으로 평가되었다. 또한, 운영기간 15일을 기준으로 0, 100, 150, 200rpm의 부식도는 각각 92.6, 135.7, 149.3, 155.7 MDD로 나타났으며, 교반을 하지 않은 0 rpm을 기준으로 100 rpm은 부식도가 46.7%, 150 rpm은 62.2%, 200 rpm은 69.4% 부식도가 상승하였다.

주철, 탄소강, PE 시편에서 지표수와 하수처리수 단독보다 지표수+하수처리수 시료에서 Shannon Index가 상대적으로 낮게 나타났다.

주철시편의 경우 하수처리수의 양이 증가하면서 *Alphaproteobacteria*의 양이 감소하면서 *Betaproteobacteria*가 우점종화 된 것으로 나타났다. 그러나 탄소강 시편의 경우 특정 미생물의 독점적인 우점종화는 일어나지 않았으며, 미생물이 다양하게 분포되어 있는 것으로 나타났다. PE 시편의 경우, 하수처리수의 양이 증가할수록 *Betaproteobacteria*의 우점종화가 뚜렷하게 일어났다.

#### 감사의 글

이 논문은 인천대학교 2015년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었음(This work was supported by Incheon National University(International Cooperative) Research Grant in 2015).

#### References

- Brodeur, T., F. S. Davis, R. Florence, M. Kim, M. Craig, J. Gianatasio, D. Sharp, and P. Lowe. 2006. From Red Water to Pump Failures-corrosion Control Activities & Related Studies. *Florida Water Resour. J.* 12: 42-48.
- Dietz, J. D., J. S. Taylor, L. A. Mulford, C. J. Cullen, and C. A. Owen. 2002. Assessment of Source Water Blends on Distribution System Water Quality. *Proceeding of Water*

- Quality Technology Conference, American Water Works Association.*
- Edwards, M. S. 2002. Perspective on Corrosion Inhibitor Use in Potable Water Supplies. *International Workshop on Corrosion Inhibitor for Public Water Supply.* 41-64.
- Javed, M. A., P. R. Stoddart, E. A. Palombo, S. L. McArthur, and S. A. Wade. 2014. Inhibition or Acceleration: Bacterial Test Media Can Determine the Course of Microbiologically Influenced Corrosion. *Corros. Sci.* 86: 149-158.
- Kwak, Phill Jae, Hyun Dong Lee, Sang Ho Nam, and Won Sik Chung. 2001. The Characteristic Properties of Corrosivity and Metal Release on Water Quality with Water Resources. *J. of KSEE.* 23(7): 1195-1203.
- Pillay, C. and J. Lin. 2014. The Impact of Additional Nitrates in Mild Steel Corrosion in a Seawater/Sediment System. *Corros. Sci.* 80: 416-426.
- Reiber, S., S. Poulosom, S. A. L. Perry, M. Edwards, S. Patel, and D. M. Dodrill. 1997. *A General Framework for Corrosion Control Based on Utility Experience.* AWWA Research Foundation, Denver, CO.
- Rushing, J. C., L. S. McNeill, and M. Edwards. 2003. Effects of Aqueous Silica on the Corrosion of Iron. *Water Research.* 37: 1080-1090.
- Sabrina, Hedrich, Michael Schlo Ann, and D. Barrie Johnson. 2011. The Iron-oxidizing Proteobacteria. *Microbiology.* 157: 1551-1564.
- Tang, Z. J., S. K. Hong, W. Z. Xiao, and J. Taylor. 2006. Characteristics of Iron Corrosion Scales Established under Blending of Ground, Surface, and Saline Waters and Their Impacts on Iron Release in the Pipe Distribution System. *Corros. Sci.* 48: 322-342.
- Taylor, J. S., J. J. Dietz, S. K. Hong, and A. Randall. 2003. Distribution System Water Quality Following Blending Surface, Ground and Saline Sources. *Proceeding of ACE Conference.*
- Yang, F., B. Y. Shi, J. N. Gu, D. S. Wang, and M. Yang. 2012. Morphological and Physicochemical Characteristics of Iron Corrosion Scales Formed under Different Water Source Histories in a Drinking Water Distribution System. *Water Res.* 46: 5423-5433.
- Korean References Translated from the English*
- 곽필재, 이현동, 남상호, 정원식. 2001. 국내 수계별 수돗물의 부식성 및 금속용출 특성평가에 관한 연구. *대한환경공학회지.* 23(7): 1195-1203.

---

Received: Oct. 10, 2016 / Revised: Oct. 31, 2016 / Accepted: Nov. 10, 2016

## 다중수원 이용 시 관 수질 사고 방지를 위한 부식도 평가 및 제어방법 연구

국문초록 본 연구는 지표수와 하수처리수를 Water Blending을 하여 이용할 경우, 관 수질 오염사고 및 급격한 부식문제 발생에 대한 영향을 평가하고 이를 제어하기 위한 연구를 수행하였다. 실험결과, 지표수, 하수처리수, 지표수+하수처리수에서 탄소강이 주철보다 14.7%~30.9% 빠르게 부식되었다. 이러한 부식을 제어하기 위해 CO<sub>2</sub>를 용해시킨 액상소석회를 투입한 결과 CaCO<sub>3</sub> 0 mg/L를 기준으로 15일 후 CaCO<sub>3</sub> 30 mg/L는 39.15%, CaCO<sub>3</sub> 60 mg/L는 54.70%의 부식저감 효과가 있는 것으로 나타났다. 교반속도가 증가할수록 부식속도 및 부식도가 증가하였으며, 교반을 하지 않은 0rpm을 기준으로 100rpm은 부식도가 46.7%, 150rpm은 62.2%, 200 rpm은 69.4% 부식도가 상승하였다. 지표수와 하수처리수 단독보다 지표수+하수처리수 시료에서 Shannon Index가 상대적으로 낮게 나타났으며, 주철과 PE시편에서 미생물 *Betaproteobacteria*가 우점종화된 반면, 탄소강 시편에서는 미생물 우점종화 뚜렷하게 일어나지 않았다.

주제어 : 관 부식, 수자원 혼합, 부식 미생물, 부식도, 액상소석회

Profiles **Sung Hoon Shin** : He received his M.A. from Chung-ang University, Korea in 2009. Currently He is a researcher of the National Institute of Environmental Research(hoony2002kr@naver.com).

**Jong Tai Jung** : He received his Ph.D. from Jersey Institute of Technology, America in 1994. He is a professor of the Department of Civil and Environmental Engineering at Incheon National University(jtjung@inu.ac.kr).