



소석회와 이산화탄소를 이용한 수도물 부식성 제어에 관한 연구

A study on the corrosion control of tap water by lime and carbon dioxide

정원석¹ · 김진근^{2*} · 박덕준¹ · 김선욱¹ · 정상기¹

Wonsuk Cheong¹ · Jinkeun Kim^{2*} · Dukjoon Park¹ · Sunwook Kim¹ · Sanggi Jeong¹

1 K-water 황성권관리단, 2 제주대학교 환경공학과

(2011년 1월 26일 접수 ; 2011년 4월 1일 수정 ; 2011년 4월 5일 채택)

Abstract

A method to improve internal corrosion control efficiency by adding lime and carbon dioxide, which, in turn increases the Langelier Index (LI) for filtered water at a conventional drinking water treatment plant (WTP) was investigated. The SJ WTP (Q=100,000 m³/d) has been operating an internal corrosion control system since 2006. The system has achieved stable operation through technical development and trial and error over a period of several years. As a result of the operation, the LI of treated water has increased up to 29% by adjusting pH of filtered water to 7.8 with the addition of lime and carbon dioxide. Coupon tests in the distribution system indicated that the corrosion rate has been delayed by 24% when the internal corrosion method was implemented. The increase of LI by lime and carbon dioxide has been proven to be a practical method for controlling corrosion.

Key words : internal corrosion, corrosion control, lime, carbon dioxide, Langelier Index, corrosion rate

주제어 : 내부부식, 부식제어, 소석회, 이산화탄소, 랭겔리아 지수, 부식도

1. 서론

최근 국내 정수처리기술은 질적 양적으로 빠르게 발전하고 있다. 국내의 일정 규모 이상의 정수장에서 생산되는 수도물의 수질은 세계 어디와 비교해도 큰 손색이 없으며(김 등, 2010), 시설 측면에서도 고도처리, 막여과 등 선진기술이 속속 도입되고 있다. 그러나, 2008년 환경부에서 실시한 “환경보전에 관한 국민의식조사”에 따르면 수도물을 직접 마시는 비율은 1% 내외로 수도물 수질에 대한 불신은 여전히 높은 수준이다. 수도물 수질 불신의 가장 큰 이유는 막연한 불안감, 냄새 및 녹물 발생 등이다(환경부, 2011).

공급과정 중 녹물 발생의 1차적인 원인은 수도관의 내부 부식이며, 2차적으로 수도관 내 수리적 조건 변화 등으로 발생할 수 있다. 물은 기본적으로 부식성을 갖고 있으며, 수도관의 내부부식은 금속관 표면과 물의 접촉에 의한 물리적, 화학적, 생물학적 복합반응의 결과로 발생한다. 내부 부식에 영향을 미치는 화학적 요소로는 pH, 알칼리도, 용존산소, 잔류염소, TDS, 경도 및 황산이온 등이 있으며, 물리적 요소로는 유속, 수온, 관의 종류 및 재질 등이 있다(이 등, 2009; Schock, 1999; AWWA, 1986).

부식성 수질의 정도는 Langelier Saturation Index(LSI 또는 LI), Ryznar Index(RI), Aggressiveness Index

* Corresponding author Tel:+82-64-754-3448, Fax:+82-64-725-2483, E-mail: kjinkeun@jeju.ac.kr(Kim, J.K.)

(AI), Calcium Carbonate Precipitation Potential (CCPP) 등과 같이 대개 탄산칼슘 침전원리에 근거한 지수로 평가할 수 있다(황 등, 2009; 구 등, 2006; Schock, 1999). 이 중 LI는 미국, 네덜란드, 독일 등에서도 부식성 수질지표로 사용하고 있으며, 일반적으로 LI가 0보다 작을 경우 수돗물은 부식성을 나타낸다. 일본의 경우 LI를 -1~0, pH를 7.5 정도 유지하는 것을 국가 수질관리 목표 항목으로 설정하여 운영하고 있으며, 최근 국내에서도 수돗물 부식성 관리의 필요성이 제기되고 있는 실정이다(국립환경과학원, 2009). 국내에서 대부분의 상수원으로 사용하는 지표수는 대개 알칼리도, pH 등이 낮은 수돗물의 부식성이 다소 높은 편이다(K-water, 2010).

한국수자원공사(K-water)에서 운영관리하고 있는 SJ 정수장은 2006년부터 국내 최초로 소석회와 이산화탄소를 이용한 수돗물 부식성 제어설비를 실규모 정수장에서 운영해 왔으며 그동안 많은 시행착오를 거쳐 해당 기술의 완성도를 높였다. 본 논문에서는 SJ 정수장 관내부식 제어설비의 운영사례를 바탕으로 소석회와 이산화탄소를 이용한 수돗물 부식성 개선 방법을 제시하고자 한다.

2. 실험대상 및 방법

2.1. 정수장 및 수질

SJ 정수장(시설용량 : 100,000 m³/일)은 강원도 소재 황성담에서 취수하여 정수처리를 하고 있으며, 정수처리공정은 취수-응집-공기부상(DAF)-급속여과-염소소독공정으로 구성되어 있다.

수돗물 부식성 제어설비는 2006년도에 Fig. 1-a와 같이 이산화탄소와 분말 소석회를 용해하여 주입하는 설비로 구성되었으며 주입지점 및 방법은 여과지와 정수지의 연결 관로에 디퓨저로 주입한다. 최종 처리수의 목표 pH 제어를 위해 약품주입지점 후단에 수질연속자동측정기를 설치하였

으며 최종 처리수의 pH 값을 반영하여 이산화탄소 주입량이 자동 제어된다. 한편, 분말 소석회를 안정적으로 주입하기 위해 소석회 포화수 제조 장치를 고안하여 설치하였다. 포화기의 전체적인 구조는 고속응집 침전장치와 유사하며 덜 용해된 소석회 입자들을 침전시켜 깨끗한 소석회 포화수를 생산하여 주입되도록 하였다.

한편, 2010년도부터는 Fig. 1-b에 제시된 바와 같이 분말소석회를 액상소석회로 대체하였다. 분말소석회의 복잡한 주입 공정 및 단점을 개선하여 액상소석회를 간단히 직접 주입할 수 있도록 설비를 개선하여 사용 중이다(정 등, 2009).

SJ 정수장의 2010년 원수와 정수 수질 현황은 Table 1과 같다. 호소수 수질 특성상 계절별 편차는 있으나 연도별 편차는 작으며 2010년 정수장 유입 원수의 LI는 연평균

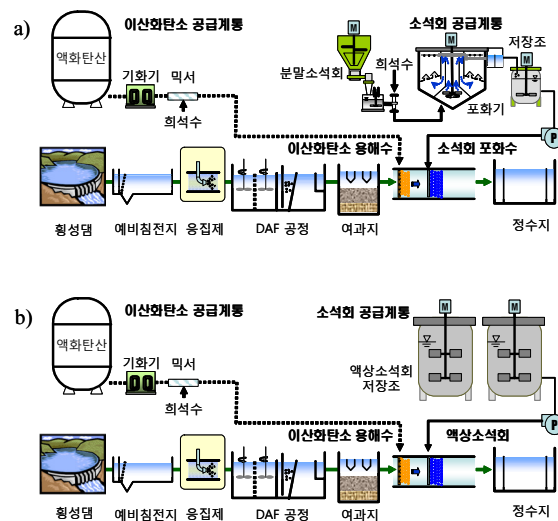


Fig. 1. Schematic of internal corrosion control system at SJ WTP

Table 1. Water quality of SJ WTP in 2010

구 분	단 위	측정주기	원 수	정 수
pH	-	1회/일	6.2 ~ 7.6 (7.1)*	6.3 ~ 7.9 (7.5)
수온	℃	1회/일	4.0 ~ 23.0 (12.4)	4.0 ~ 23.2 (13.1)
증발잔류물	mg/L	1회/주	13.0 ~ 125.0 (63.8)	3.0 ~ 122.0 (64.0)
칼슘경도	mg/L as CaCO ₃	1회/주	21.7 ~ 43.4 (27.1)	26.4 ~ 39.3 (32.1)
알칼리도	mg/L as CaCO ₃	1회/주	19.6 ~ 31.5 (26.1)	20.4 ~ 39.0 (29.0)
LI	-	1회/주	-2.8 ~ -1.6 (-2.0)	-2.7 ~ -0.8 (-1.5)

* 괄호 안은 평균값임

-2.0이었고 부식성 수질개선을 통한 정수의 LI 평균값은 -1.5였다. 수돗물 부식성 제어설비의 운전목표는 소석회 투입률은 5~10 mg/L, 처리수 pH는 7.8로 운영하였다.

2.2. 수질분석

수돗물의 부식성 수질개선에 따른 효과검증을 관내부식 제어설비 운영과 병행하여 실시하였다. 효과검증은 1, 2차에 나누어 실시하였으며 1차 실험의 경우 W시를 대상으로 부식성 수질이 개선된 수돗물을 공급하는 지역과 일반 수돗물이 공급되는 지역을 각각 5곳씩 선정하여 시편(coupon) 테스트를 실시하였다. 시편 테스트에서 부식도(corrosion rate)는 무게 감량법으로 측정하였으며 다음과 같이 계산하였다(구 등, 2006). 부식도의 단위는 MMD(milligrams per square decimeter-day, mg/dm²·day)로 나타낸다.

$$\text{부식도}(mg/dm^2 \cdot day) = \frac{\text{시편의 초기무게}(mg) - \text{시편의 시험후무게}(mg)}{\text{시편의 표면적}(dm^2) \times \text{시험침적일수}(day)}$$

2차 실험은 정수장에서 부식성 수질 제어 전후 시료와 배수지 한 곳의 시료를 대상으로 시편 테스트를 실시하되 일정 주기로 시편을 회수하여 부식으로 인해 외관이 변하는 모습을 비교 관찰하였다.

시편실험 장치의 개요도는 Fig. 2에 나타내었다. 아크릴 칼럼의 내경은 3 cm 였고, 높이는 100 cm 였으며, 칼럼 내 유속은 0.033 m/sec로 조절하였다. 실험장치 중간에 고정시킨 시편은 강관을 적당한 크기(78×10×2 mm)로 절단하여 표면을 깨끗이 세정한 후에 사용하였다. 시편은 일정기간 동안 흐르는 시료수와 접촉시켰다. 실험기간 동안 부식이 진행되면 시편을 조심스럽게 회수하여 먼저 외관을 살폈으며 35% 염산에 20분 동안 정치시켜 부식된 부분을 제거하였다. 이때 대조군 실험도 병행하여 무게 감량을 보았다. 시편은 염산과 반응시킨 후 깨끗한 증류수에 수차례 씻은 다음 건조시켜 부식으로 인한 무게 감소량을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 관내부식 제어설비의 안정성

SJ 정수장 관내부식 제어설비는 2006년 10월부터 운영하였으며 수차례 설비 보완이 이루어졌다. 설비가동 초기인 2006년에는 평균 38%의 가동률을 보였고 2007년, 2008년에는 각각 50%, 61%를 나타냈다. 한편, 2010년 9월 분체에서 액상소석회 설비로 전환한 이후 100% 가동률을 보

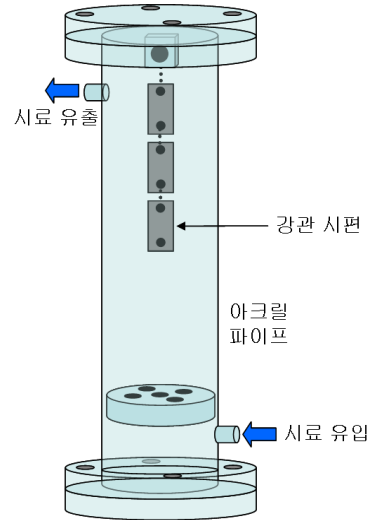


Fig. 2. Schematic of coupon test column(not to scale)

여 현재는 매우 안정적으로 시설이 운영되고 있다.

관내부식 제어설비의 초기 가동률이 낮았던 이유는 분말 소석회 투입설비에 잦은 문제가 발생했기 때문이다. 분말 소석회는 20℃에서 용해도가 1.731 g/L로 낮은 편이며, 소석회 슬러리의 경우 점도가 높아 약품 배관 내에 쉽게 침전하고 공급배관에 스케일을 형성한다. 이러한 스케일 생성으로 배관의 이송능력이 저하되거나 막히게 되면 설비 운영이 중단될 수 있다. 또한 깨끗한 소석회 포화수를 만들어내는 포화기 내부에 슬러지가 발생하여 주기적으로 청소해야 하는 문제도 있다.

소석회 배관내부의 스케일 생성 문제는 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 루프(loop)형 약품배관을 구성하고 주기적으로 황산을 이용한 세정으로 문제점을 해결하였다. 소석회 슬러지 발생 문제는 잘 용해되지 않는 분말소석회 대신에 액상 소석회를 사용하였으며, 분말소석회 사용 시 운영하였던 포화수 생산 공정을 과감히 생략하고 액상소석회를 정수지 전단에 투입하도록 하였다. 그 결과 소석회 투입설비를 콤팩트하게 개선하였고, 관내부식 제어설비도 운휴 없이 안정적으로 운용할 수 있었다.

3.2. 송수관내 부식제어 수질의 안정성

송수관망 내부에서 체류시간에 따른 수돗물의 LI 변화를 조사하였다. 총 6차례 체류시간별로 시료를 채취하여 부식 지수를 측정된 결과는 Fig. 4와 같다. 그래프에서 나타나듯이 일단 부식성이 제어된 수돗물은 송수관망 내부에서 안정적으로 유지되는 것을 알 수 있다. 여과수의 경우 부식성

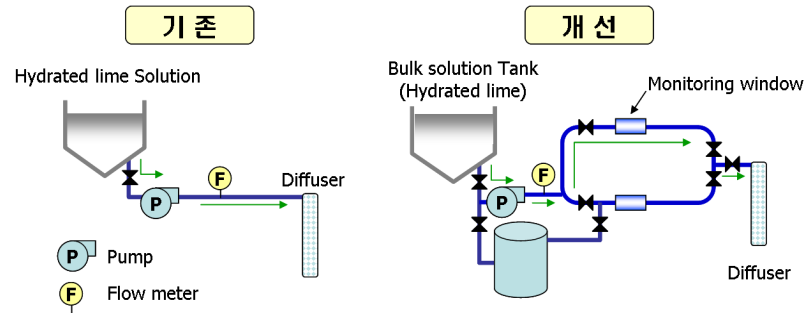


Fig. 3. Loop cleaning method for lime feeding pipes

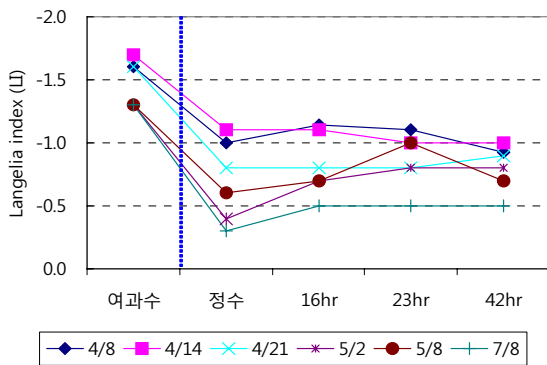


Fig. 4. Variation of LI in the distribution system : effect of contact time (2008)

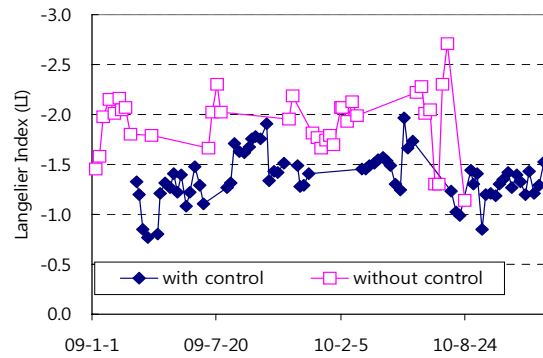


Fig. 5. Comparison of LI of filtered water under internal corrosion control and without control

제어 이전이며, 정수의 경우 소석회 및 이산화탄소가 주입된 수돗물이다. 수돗물 송수과정에서 부식지수의 큰 변화는 발생하지 않았고 조금씩 LI의 증감이 나타나는 것은 송수배관(DCIP 150~1,200 mm)내 시멘트 라이닝에서 칼슘 등이 녹아나오는 영향으로 판단된다.

3.3. 부식성 수질 개선 및 정수 탁도 영향

Fig. 5는 2009년부터 주 1회 간격으로 정수의 LI를 측정 한 그래프이다. 측정 기간 중 관내부식 제어설비를 가동한 날과 그렇지 않은 날을 각각 '부식 제어' 와 '부식 미제어' 로 구분하여 표시하였다. 관내부식 제어설비를 운용한 날의 LI는 평균 -1.37이었고 가동하지 않은 날의 LI는 -1.92였다. 따라서 측정 기간 중 관내부식 제어설비 운용에 따른 부식성 개선률은 약 29% 였다. LI의 증가는 소석회 주입에 따른 pH와 칼슘경도에 기인하는 것으로 판단된다. 한편, 이산화탄소를 주입하지 않은 경우에는 원수의 알칼리도가 낮아 소석회 주입량이 적음에도 불구하고 급격한 pH 및 낮은 소석회 용해도로 인해 처리수의 탁도 상승이 발생

한다. 따라서 적정 pH 및 처리수 탁도를 유지하면서 칼슘경도를 상승시키기 위해서는 이산화탄소의 주입이 필요하다 (김 등, 2006).

한편, 여과공정 이후에 소석회를 주입할 경우 정수 탁도가 상승할 것으로 예상되었다. 하지만 Fig. 6과 같이 수돗물 부식성 제어를 실시한 기간과 그렇지 않은 기간 사이에 정수탁도는 큰 차이가 없었다. 그 이유는 소석회 주입시 pH 제어를 위해 주입하는 이산화탄소가 소석회의 용해율을 증가시키기 때문에 탁도에 대한 영향이 적은 것으로 판단된다.

3.4. 정수장 및 배수지에서 시편 테스트 결과

정수장과 배수지에 동일한 강관시편을 다수 설치하고 10여일 간격으로 회수하여 접촉 시간에 따른 부식 진행 정도를 비교 관찰하였다. 정수장 여과지 유출측에 소석회와 이산화탄소 주입지점을 전후하여 Fig. 2와 같이 시편 테스트 장치를 설치하였고 같은 수돗물이 공급되는 인근 MM 배수지에도 동일한 장치를 설치하였다.

부식성 제어를 실시한 시편의 경우 Fig. 7에 나타난 바

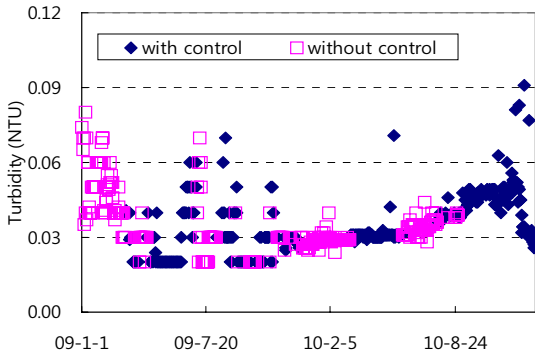


Fig. 6. Comparison of turbidity of filtered water under internal corrosion control and without control

와 같이 100일이 경과된 이후에도 외관상 차이가 상대적으로 작았다. 부식제어를 하지 않은 실험장치의 시편인 경우 60일을 전후해서 표면에 녹 발생이 시작되었으며 100일 경과 후에는 부식제어를 실시한 시편과 뚜렷한 차이를 보이면서 부식이 발생하였다. 따라서 수도물 부식성 제어는 수도관의 부식발생 지연에 매우 효과적인 방법으로 판단된다. 부식도는 특히 반응초기에 급격한 변화를 나타내었다. 접촉시간이 10일 경우 부식도는 부식제어의 경우 101.12 mg/dm²-day, 부식미제어의 경우는 142.67 mg/dm²-day로 나타났다. 한편 100일 경과 후 부식도는 부식제어의 경우 13.66 mg/dm²-day, 부식미제어의 경우에는 23.37 mg/dm²-day로 나타나 시간이 경과할수록 부식은 완만하게 진행되었으며, 부식제어를 할 경우 부식도가 현저하게 감소되는 것으로 조사되었다.

3.5. 급배수 관망 내부에서 시편 테스트 결과

SJ 정수장에서 생산된 수도물과 자체 정수장에서 생산된 수도물을 동시에 이용하는 W시를 대상으로 부식지수 개선에 따른 수도물 부식성 변화를 분석하였다. W시 시내 10개 지점(부식 제어 5개소, 부식 미제어 5개소)에 강관 시편을 설치한 후 100여일 후, 부식도를 측정하였다. 부식도 조사와 동시에 각 지점별로 실시한 수질조사 결과는 Table 2와 같다. 부식제어 미설시 지점의 부식도는 평균 18.2 mg/dm².d였고 부식제어 지점의 부식도는 13.9 mg/dm².d로 나타나 전체적으로 약 24%의 부식도 감소효과를 보였다. 그러나 Fig. 8과 같이 지점별로 다양한 편차가 나타나고 있어 강관시편 부식에 있어서 부식성 수질에 의한 영향 이외에도 수온, 관내유속, 수도물 사용빈도 등의 복합적인 영향이 상존함을 알 수 있다. 따라서 급배수 관망 내부에서 시편 테스트

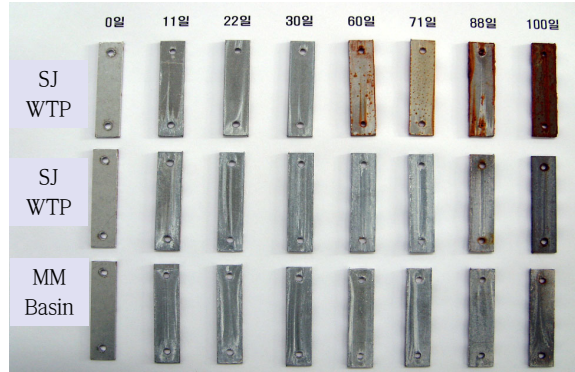


Fig. 7. Photographs of coupons with different contact time (상 : 부식성 미제어, 중·하 : 부식성 제어)

트를 실시할 때, 부식성 수질영향에 대한 독립적인 효과분석을 위해서는 동일 지점, 동일 시기에 부식제어 실시 기간과 미설시 기간을 구분하여 부식도를 상호 비교하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

3.6. 칼슘농도와 pH에 따른 LI 변화

정수장에서 수질조정을 통해 수도물의 부식성을 제어하는 방법으로는 부식억제제, 가성소다, 소석회, 소석회+이산화탄소 병행 사용으로 구분할 수 있다. SJ 정수장에서는 급배수 관망에서의 안정적인 pH 유지와 정수탁도 유지를 위해 소석회와 이산화탄소를 병행 사용하는 방법을 사용하여 수도물 부식성을 제어했고 주입하는 소석회를 분말에서 액상으로 전환하여 설비의 안정적인 운용이 가능하도록 하였다. 한편, 최적 주입조건과 주입률 결정은 모의실험을 통해 결정하였으며 목표 pH 7.8, 소석회 주입률 5~10mg/L, 부식제어지수 -1.0~-1.5 정도였다.

정수장에서 수도물 부식성 제어를 실시하는 경우, 단지 LI만을 기준으로 한다면 간단히 pH 조정만으로도 효과를 볼 수 있다. 다시 말하면 SJ 정수장처럼 원수의 칼슘경도가 상시 10 mg/L 이상만 되어준다면 pH를 올리는 쪽이 소석회 주입량을 늘리는 것 보다 쉽게 부식지수를 개선할 수 있다는 것이다. 또한, 현실적으로도 20 mg/L 이상의 소석회 주입은 공정관리자로서 부담이 많다. 더욱이 상용화된 액상 소석회의 농도는 수산화칼슘 기준 20% 이므로 약품 저장을 위한 부대비용이 증가되어 주입량을 무한정 올리는 것이 쉽지 않다. 따라서 실제 정수장에서 수도물 부식성 제어 설비를 운영할 경우에는 원수의 pH, 알칼리도, 경도 등을 종합적으로 고려하여야 한다.

SJ 정수장에서는 알루미늄 용출이나 소독부산물에 대한 염려 때문에 정수의 목표 pH를 7.8로 하고 있으나 여과수

Table 2. Water quality of the sampling sites at W city (2009)

지점 번호	수온		pH		잔류염소(mg/L)		알칼리도 (mg/L CaCO ₃)		칼슘경도 (mg CaCO ₃ /L)		L I 값	
	05월 12일	08월 21일	05월 12일	08월 21일	05월 12일	08월 21일	05월 12일	08월 21일	05월 12일	08월 21일	05월 12일	08월 21일
1	18.1	24.9	7.2	7.2	0.6	0.6	35.8	41.3	31.3	75.7	-1.6	-1.1
2	17.8	24.6	7.3	7.2	0.7	0.8	37.3	37.8	38.5	47.8	-1.4	-1.3
3	19.3	25.3	7.4	7.2	0.4	0.6	36.4	39.6	41.3	36.6	-1.3	-1.4
4	19.8	25.2	7.7	7.6	0.0	0.1	38.0	35.0	40.7	39.0	-1.1	-1.1
5	19.0	25.3	7.6	7.3	0.3	0.3	39.8	36.4	33.4	36.9	-1.3	-1.3
6	15.3	19.5	7.7	7.6	0.7	0.7	34.3	20.7	27.8	25.0	-1.3	-1.6
7	12.6	20.6	7.7	7.4	0.5	0.3	36.0	20.6	33.5	26.4	-1.4	-1.8
8	15.8	22.1	7.7	7.6	0.3	0.6	34.6	N/A	32.1	N/A	-1.3	N/A
9	17.6	24.0	7.7	7.5	0.3	0.2	32.2	19.2	31.5	24.1	-1.2	-1.6
10	16.3	17.6	7.8	7.5	0.1	0.1	N/A	21.8	N/A	25.0	N/A	-1.7
11	8.7	16.8	7.5	6.8	0.5	0.4	29.3	13.9	25.8	26.1	-1.8	-2.7
12	8.7	17.8	7.8	7.5	0.5	0.9	36.6	22.4	31.8	19.6	-1.3	-1.8

[참고] (1) 지점번호 11, 12는 각각 SJ 정수장 부식 제어전 여과수, 부식 제어후 여과수질
(2) N/A : not available

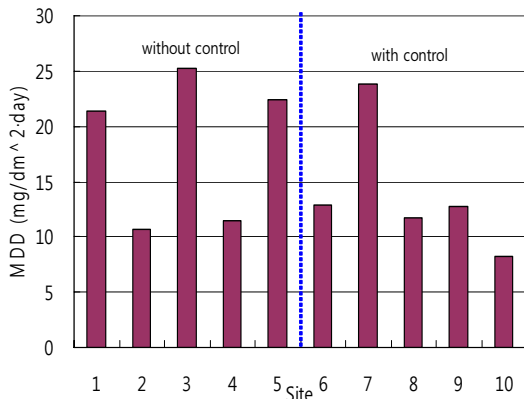


Fig. 8. Variation of corrosion rate according to sites at W city

수질이 안정적이고 설비의 pH 제어에도 큰 문제가 없다면 제어목표 pH를 8.0~8.2로 상승시키는 것도 효율적인 부식성 수질 개선을 위해 고려할만 하다. 추후에는 LI뿐만 아니라 RI, CCPP 등 다른 부식성 지수와 부식정도에 대한 추가 연구도 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

수돗물의 부식성 제어는 공급과정에서 녹물 발생 저감을 위해 매우 중요한 일이다. 특히 노후 급배수관 및 옥내배관이 많은 국내 실정상 수질조정을 통한 수돗물 부식성 제어는 매우 필요하다. 수돗물 부식성 제어를 위해 여과수에 소

석회 및 이산화탄소 주입 시스템을 운영하는 SJ 정수장을 대상으로 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 소석회와 이산화탄소를 이용한 수돗물 부식성 제어 시스템은 안정적이고 연속적인 운영이 가능하다.
2. 수돗물 부식성 제어설비의 목표 pH를 7.8, 소석회 주입률을 5~10 mg/L로 운영할 경우 LI를 약 29% 개선할 수 있었다.
3. 소석회와 이산화탄소를 이용한 부식성 수질개선 방법은 정수탁도에 미치는 영향이 미미하였으며, 송수관망 내부에서도 효과가 안정적으로 유지되었다.
4. 급배수 관망내 설치한 시편으로 확인된 부식성 수질 개선에 따른 부식도 감소는 대조군과 비교해 약 24%로 나타났으나 수온, 유속 등 다른 인자에 대한 추가 영향도 고려가 필요하다.

5. 참고문헌

- 구성은, 우달식, 이두진, 김주환, 안효권, 문광순 (2006) 수질제어 및 부식억제에 의한 상수도관의 내부부식 제어, *상하수도학회지*, 20(2), pp.215-223.
- 국립환경과학원 (2009) 수도관 노후방지를 위해 부식성 관리필요, 보도자료.
- 김성일, 우달식, 남상호, 박영복 (2006) 소석회와 CO₂로 안정화된 수돗물의 부식제어 효과, *대한환경공학회 춘계학술발표회 논문집*, pp.1067-1069.

- 김진근, 이송희, 김재원 (2010) 급속여과공정에서 여과수질 저하 원인 및 개선방안, *상하수도학회지*, **24**(3) pp.333-339.
- 이현동, 박필재, 이지은, 김영관 (2009) 상수도관망 시스템의 부식 제어를 위한 수질모니터링, *상하수도학회지*, **23**(1), pp.77-87.
- 정원석, 김태훈, 이재희 (2009) 분말소석회와 이산화탄소를 이용한 관내부식 제어설비 운영사례 연구, *상하수도학회 추계 학술발표회 논문집*, pp.223-224.
- 환경부 (2011) 먹는물 수질관리 지침.
- 황병기, 우달식 (2009) 상수원수의 부식평가 지수 산정 프로그램 개발 및 탄산칼슘 포화지수에 의한 수돗물의 부식성 평가, *한국산학기술학회논문지*, 10(4), pp.177-185.
- AWWA (1986) *Corrosion control for operators*.
- K-water (2010) *정수처리시설 종합개선계획 보완*, pp.V-100~107.
- Schock, M.R. (1999) Internal corrosion and deposition control in *Water Quality and Control* 5th Ed. AWWA, 1999.