

소석회와 CO₂를 이용한 상수관로의 부식제어(I) - 소석회 주입공정의 최적 운전인자 도출

Corrosion Control in Water Distribution System using Lime and Carbon Dioxide(I) - Determination of Optimum Operational Conditions in Lime Adding Process

손병용¹ · 변규식² · 김영일³ · 이두진^{4*}

Sohn, Byung-Young¹ · Byun, Kyu-Sik² · Kim, Young-Il³ · Lee, Doo-Jin^{4,*}

1 한국수자원공사 댐·유역관리처 2 (주)동양수기

3 충남발전연구원 충청남도수질총량관리센터 4 한국수자원공사 수자원연구원 상하수도연구소

(2008년 1월 29일 접수 ; 2008년 6월10일 채택)

Abstract

The pH & alkalinity adjustment method by lime and carbon dioxide(CO₂) for corrosion control in water distribution system was investigated to determine the optimum operational condition in lime adding process in water treatment plant(WTP). The mixing time at dissolution tank and sedimentation time at saturator for maintaining optimal turbidity condition of lime supernatant were 60~75 minutes and 75~95 minutes, respectively. There was no difference according to CO₂ adding methods such as CO₂ saturated water or CO₂ gas. But, CO₂ saturated water could be convenience at WTP in terms of pH control and quantitative dosing. To minimize generation of calcium carbonate products, the short time interval between adding of lime and CO₂ is most important. The lime should be added below 32 mg/l for preventing pH rising and generation of calcium carbonate products at the heating condition.

Key words : Corrosion control, pH & alkalinity adjustment, Lime, Carbon dioxide(CO₂), Calcium carbonate products

주 제 어 : 부식제어, pH & 알칼리도 조절, 소석회, 이산화탄소, 탄산칼슘 침전물

1. 서론

호소수를 취수원으로 사용하고 있는 우리나라 대부분 정수장의 원수는 pH와 알칼리도가 낮은 특징을 가지고 있으며, 이러한 원수를 정수처리함에 있어 무기알루미늄으로 구성된 응집제의 사용으로 알칼리도의 감소, 염소이온 및 황산이온의 증가 등에 의해 처리수질의 부식성이 증가하고 있는 실정이다(곽필재 등, 2001; 남상호, 2002). 일반적으로 상수

관로 내부부식에 영향을 미치는 수질인자는 pH, 용존산소, 총용존고형물, 잔류염소, 수온 그리고 유속 등이 있으며, 특히, pH, 알칼리도, 칼슘경도, 염소 및 황산이온 등은 주요 부식영향 인자로 분류하여 여러 나라에서 적정 범위를 정하여 관리하고 있다(Sarin et al., 2004; Sander et al., 1996; 이광호 등, 1997). 네덜란드에서는 대표적인 부식지수인 LI(Langelier index)의 적정범위를 제안하고 있고, 미국과 독일도 LI지수를 0 이상으로 제어할 것을 권고하고 있

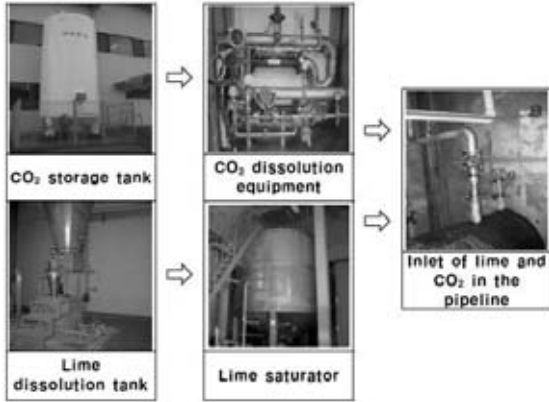


Fig. 1. Flowchart of full-scale lime and CO₂ adding process.

으나, 우리나라에서는 이러한 부식성 수질에 대한 고려가 미흡하며 별도의 관리기준이 없는 실정이다(AWWARF, 1996). 이로 인해 상수관로의 부식이 촉진되어 관로 노후화가 빨라지고 있으며, 적수 및 탁도 발생, 중금속 용출 등의 2차 수질오염문제도 발생하고 있다. 상수관로의 내부부식에 의한 2차 수질오염문제가 부각되기 시작하면서 최근에는 정수 pH 하한치를 5.8에서 6.5로의 상향조정 필요성이 대두되고 있으며, 이와 동시에 정수처리과정에서 부식성 수질을 개선하기 위한 적극적인 노력이 이루어지고 있다.

일반적으로 급·배수관망의 부식을 억제하기 위한 방법은 크게 3가지로 요약할 수 있는데, 첫째, 수질을 조절하여 부식성을 개선시키는 방법, 둘째, 관 내부에 코팅이나 라이닝을 입히는 방법, 마지막으로 관종이나 시스템을 변경하여 부식을 제어하는 방법이다(USEPA, 1984). 이 중에서 정수장 처리수의 수질을 조절하여 부식성을 개선하는 방법이 가장 널리 이용되는 방법으로 소석회, 가성소다, 소다회, 중탄산나트륨 등과 같은 약품을 주입하여 pH와 알칼리도 조절을 통하여 부식을 제어하는 것이다(Volk et al., 2000; 이현동 등, 2000). 최근 우리나라 여러 정수장에서도 다양한 부식제어기법을 연구하고 있으며, 일부는 실공정에 적용이 이루어지고 있는 실정이다(구성은 등, 2006; 한국수자원공사, 2004). 본 연구에서는 소석회와 이산화탄소(carbon dioxide, CO₂)를 이용하여 pH 및 알칼리도 조절을 통한 부식제어 방법을 실규모 정수장에 적용하기 위해 소석회의 용해특성 및 소석회 투입에 따른 수질변화 등을 조사하여 소석회 주입공정의 적정 운전인자를 도출하고자 하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 실규모 소석회 주입공정

상수관로 부식 제어를 위한 실규모 소석회 주입공정은 시설용량 150,000 m³/d의 S정수장에 설치되어 있다. 정수장

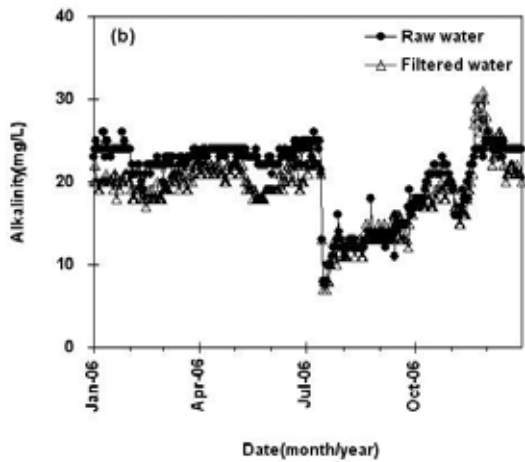
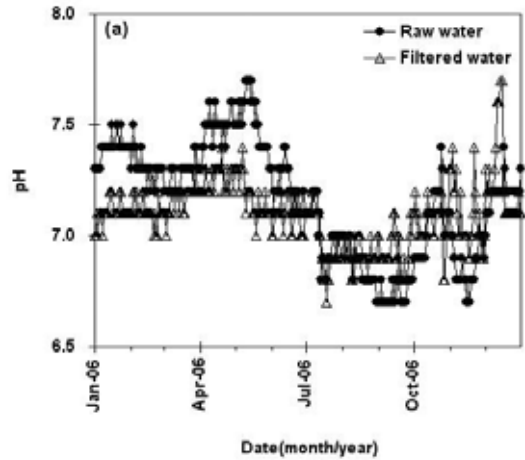


Fig. 2. Variation of pH(a) and alkalinity(b) of raw and filtered water during experimental period in S water treatment plant.

의 소석회 주입설비는 크게 소석회를 용해하는 용해조와 소석회 혼합액을 고액분리시키는 포화기(saturator)로 이루어져 있으며, 포화기 상등수를 정수공정의 여과수에 주입한 후 이산화탄소를 추가 주입하여 pH와 알칼리도를 조절하도록 설계되었다. 참고로 Fig. 1은 실규모 소석회 및 CO₂ 주입공정 흐름도를 나타내었다.

2.2 실험대상 원수의 수질특성

실험에 사용한 원수의 부식성 수질특성을 조사하기 위하여 실험이 이루어진 2006년 정수장 유입원수 및 여과수의 pH와 알칼리도 변화를 Fig. 2에 나타내었다. 호소수를 원수로 사용하는 S정수장의 pH와 알칼리도 변화는 계절에 따라 뚜렷한 차이를 보였다. 봄철인 4~5월에 조류에 의해 pH와 알칼리도가 가장 높게 나타났으며, 강우가 집중되는 여름철인 8~9월에 가장 낮은 값을 보였는데, 이는 호소수를 원수로 사용하는 정수장의 전형적인 결과이다. 원수의 pH는 평균 7.2(6.4~7.7), 알칼리도는 평균 20.6 mg/l (8.0~26.0 mg

/l)이었고, 정수 pH는 원수보다 약간 낮은 평균 7.1(6.7~7.7), 알칼리도는 평균 18.8 mg/l (7.0~31.0 mg/l)의 값을 보였다.

2.3 소석회 용해조와 포화기의 최적 체류시간 결정

소석회 용해조와 포화기의 최적 체류시간을 구하기 위하여 소석회를 다양한 교반 및 침전조건에서 용해시킨 후 수질변화를 측정하였다. 모든 실험은 Jar tester(PB900TM Programmable Jar tester, 7790-912, Phipps & Bird, VA, USA)와 2 l 의 사각형 Jar(B-KER2, Phipps & Bird, VA, USA)를 이용하여 수행하였다. 먼저 2 l Jar에 여과수를 채우고 소석회를 주입하여 초기 농도를 1,500 및 3,000 mg/l 로 만든 다음, 90 G의 속도경사로 일정 시간동안 교반 및 침전시킨 상등수를 채취하여 pH와 탁도를 측정하였다.

2.4 CO₂ 주입방식에 따른 수질변화

소석회의 용해도를 향상시키고 탁도 및 pH를 일정하게 유지시키기 위해 소석회와 함께 사용되는 CO₂의 주입방식에 따른 수질변화를 조사하였다. 먼저 여과수 2 l 를 여러 개의 Jar에 각각 넣은 다음 1500 mg/l 로 만든 소석회 상등수 일정량을 각각의 Jar에 넣어 최종 소석회 농도를 각각 16, 32 mg/l 가 되도록 만들었다. 여기에 CO₂가스를 직접 포기시키거나 CO₂가스를 일정시간동안 여과수에 녹여 만든 CO₂ 포화수(pH 5,6)를 주입하여 pH가 7.8이 되도록 조정하고 30G로 교반한 다음 상등수를 채취하여 pH 및 탁도 변화 등을 측정하여 CO₂ 주입방식에 따른 탁도생성을 평가하였다.

2.5 소석회와 CO₂ 주입순서 및 시차에 따른 수질변화

소석회와 CO₂ 주입에 따른 수질변화를 조사하기 위하여 Jar에 2 l 여과수를 넣고 소석회와 CO₂를 주입한 다음 일정시간 반응 이후에 상등수를 채취하여 수온, pH, 탁도, 전기전도도, 알칼리도, Ca²⁺ 정도, 그리고 LI 지수 등을 측정하였다. 한편, 소석회와 CO₂ 주입순서와 시차에 따른 수질변화 여부를 조사하기 위하여 소석회 45 mg/l 와 CO₂를 주입순서와 시차를 변화시켜가면서 pH, 탁도, 알칼리도, 그리고 칼슘정도 등을 측정하였다. 모든 실험은 앞서 수행한 실험방법과 동일한 방법으로 수행하였다.

2.6 가열에 의한 수질변화 및 침전물 형성

소석회를 실공정에 적용하는 경우 정수의 수질변화를 평가하기 위하여 소석회 투입 이후 가열에 의한 처리수의 수질변화 및 침전물 형성 등을 알아보았다. 이는 수요가의 수도물 소비 형태 상당부분이 끓여서 음용하고 있기 때문에 가열에 의한 영향을 분석하기 위해서 수행되었다. 먼저 여과수 2

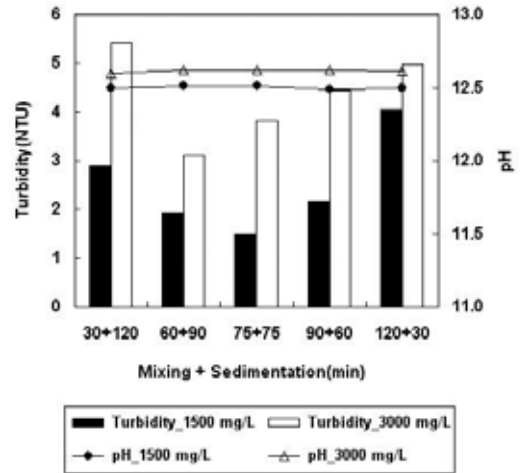


Fig. 3. Variation of turbidity and pH in the water with time according to mixing and sedimentation time.

l 에 소석회를 8~48 mg/l 의 범위에서 다양하게 주입한 다음 CO₂를 주입하여 pH를 7.8로 동일하게 조절하였다. 처리수를 100 °C까지 가열한 다음 실온에서 냉각시킨 후, 상등수의 pH, 알칼리도, 총경도와 침전물의 발생 유무를 측정하였다.

2.7 분석방법

pH와 수온은 pH meter(HM-20P), 탁도는 Turbidimeter(2100-AN Hach), 전기전도도는 전기전도도계(460-CP, Istek), 알칼리도(AL-DT, Hach), 총경도 및 칼슘정도(HA-DT, Hach)는 Digital Titrator를 이용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 소석회 용해조와 포화기의 최적 체류시간 결정

소석회와 CO₂를 이용한 부식제어 공정에서 소석회의 용해도는 pH를 높이고, 칼슘정도 및 알칼리도를 생성하여 잠재적인 탄산칼슘 침전반응을 결정하는 중요한 인자이다. 상수관로의 부식 제어를 위한 소석회는 일반적으로 여과공정 이후에 사용되기 때문에 재료의 특성상 용해도가 낮은 소석회가 적절하게 용해되지 않은 상태에서 주입되면 최종처리수는 물론 수도꼭지에서 탁도를 유발할 우려가 있으므로 적절한 주입농도와 운전조건을 도출하는 것이 가장 중요하다 할 수 있다.

Fig. 3은 정수장 현장에서 사용할 액상소석회를 제조하기 위한 소석회 용해조와 포화기의 운전조건을 결정하기 위하여 다양한 교반 및 침전시간 변화에 따른 pH 및 탁도변화를 나타낸 결과이다. 소석회 주입농도가 증가함에 따라 상등수의 탁도는 증가한 반면, pH는 거의 변화가 없었다. 교반시간이

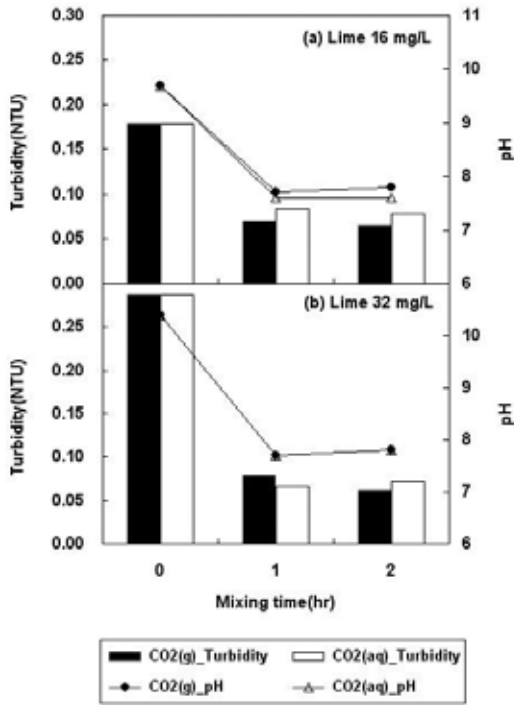


Fig. 4. Variation of turbidity and pH by CO₂ adding method. (a) Lime 16 mg/L, (b) Lime 32 mg/L.

60~75분, 침전시간이 75~90분인 조건에서 가장 낮은 탁도를 보였으며, 소석회 농도가 3,000 mg/l 인 경우 30분 교반, 120분 침전 실험을 제외하고 침전시간이 줄어들수록 상등수의 탁도는 증가하는 경향을 보였다. 이는 현장에서 부식제어를 위한 소석회 포화수를 제조함에 있어 소석회 용해조의 교반시간은 60~75분, 포화기의 침전시간은 75~90분 정도를 유지하는 것이 소석회 포화수의 탁도를 2 NTU 미만으로 유지시켜 정수장 실공정에 영향을 주지 않을 것으로 판단된다.

3.2. CO₂ 주입방식에 따른 수질변화

Fig. 4는 소석회를 녹인 여과수에 CO₂가스를 직접주입하거나 CO₂가스를 여과수에 포화시킨 CO₂포화수를 주입하는 방법에 따른 pH 및 탁도 변화를 나타낸 결과이다. CO₂를 주입하지 않은 조건에서 소석회 주입량이 16 mg/l 에서 32 mg/l 로 증가시킴에 따라 pH는 9.7에서 10.4로, 탁도는 0.178 NTU에서 0.287 NTU로 증가하였다. 소석회가 주입된 여과수에 CO₂가 주입되고 2 hr이 지난 이후에는 CO₂ 주입방식에 관계없이 모든 실험에서 처리수의 탁도가 0.1 NTU이하의 값을 보였으며, pH도 7.8 정도로 거의 유사한 값을 보였다. 이는 소석회가 주입된 여과수에 일정한 pH 및 탁도를 유지하기 위해 사용되는 CO₂의 주입방식은 큰 영향을 미치지 않는다는 결과이다. 그러나 CO₂를 실공정에 적용함에 있어 정수장 운영측면에서는 가스상 형태의 CO₂를 여과수에 직접 주

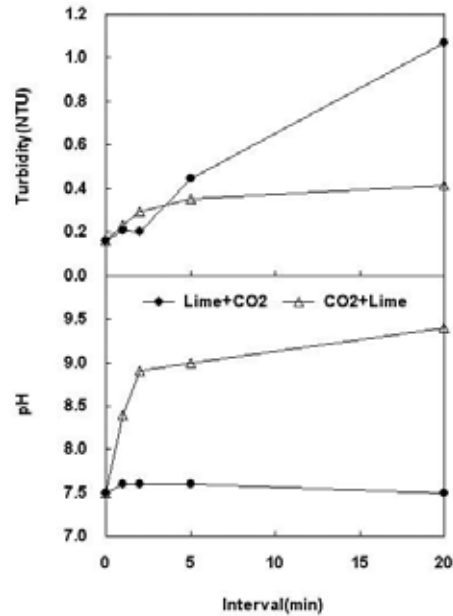


Fig. 5. Variation of turbidity and pH according to adding sequence and interval of lime and CO₂.

입하는 방법보다는 CO₂ 포화수를 여과수에 주입하는 방법이 정량주입이 용이할 뿐만 아니라 pH 조절 또한 수월할 것으로 판단된다.

3.3 소석회와 CO₂ 주입순서와 시차에 따른 수질변화

Table 1은 소석회 45 mg/l 와 CO₂를 주입순서와 시차를 변화해 가면서 pH, 탁도, 알칼리도, 그리고 칼슘경도 등을 비교 정리한 결과이다. 소석회를 먼저 투입한 경우 CO₂와의 시차에 관계없이 pH는 일정한 경향을 보였으나, 탁도는 시차가 길어질수록 증가하는 경향을 보였다. 소석회를 주입하고 1분 이후에 CO₂를 주입한 경우 탁도가 0.206 NTU인 것에 반해, 20분간의 시차를 준 경우에는 탁도가 1.07 NTU로 증가하였다. 이는 일부 소석회가 수중의 CO₂와 반응하여 탄

Table 1. Comparison of water quality parameters according to adding sequence and interval of lime and CO₂

Interval	Item	pH	Turbidity (NTU)	Alkalinity (mg/L)	Ca ²⁺ hardness (mg/L)
	Filtered water	6.9	0.086	16.8	16
Lime + CO ₂	0 min	7.5	0.162	55.2	64
	1 min	7.6	0.206	57.2	64
	2 min	7.6	0.205	57.2	66
	5 min	7.6	0.447	59.6	64
	20 min	7.5	1.07	54.8	68
CO ₂ + Lime	0 min	7.5	0.162	55.2	64
	1 min	8.4	0.235	52.0	58
	2 min	8.9	0.353	55.6	62
	5 min	9.0	0.398	52.4	60
	20 min	9.4	0.415	53.2	58

산칼슘화 되어 침전되기 때문에 사료된다. 반면, CO₂를 먼저 주입한 경우, 소석회를 먼저 주입한 경우에 비해 탁도가 약간 증가하였으며, 시차가 길어질수록 pH는 9.4까지 증가하는 경향을 보였다. 이는 용존된 CO₂가 교반에 의해 대기중으로 탈기되어 pH상승을 가져온 것으로 판단된다. 알칼리도와 칼슘경도는 주입순서와 시차에 관계없이 거의 일정한 값을 보였다. 결론적으로 소석회와 CO₂를 실공정에 적용함에 있어 탁도 측면에서는 CO₂를 먼저 주입하고 pH 측면에서는 소석회를 먼저 주입하는 것이 유리한 것으로 판단되며, 시차를 2분 이내로 유지하는 경우에는 소석회와 CO₂ 주입순서에 관계없이 상등수의 탁도를 0.2 NTU 미만으로 유지시킬 수 있을 것이다. 참고로 Fig. 5에 소석회와 CO₂ 주입순서와 시차에 따른 탁도 및 pH변화를 나타내었다.

3.4 가열에 의한 수질변화 및 침전물 형성

Table 2는 소석회 주입량을 달리하면서 여과수에 주입한 후, 처리수를 100℃까지 가열한 다음 가열전·후 처리수의 침전물 발생 유무 및 pH, 알칼리도, 그리고 총경도의 변화를 측정한 결과이다. 가열 후 처리수의 pH는 7.8에서 약 9.0까지 상승하였는데, 이는 용존된 이산화탄소가 가열에 의해 용해도가 낮아지면서 탈기되었기 때문에 판단된다. 알칼리도와 총경도는 소석회 주입량 증가에 따라 상승하는 경향을 보였으나, 가열전·후 알칼리도와 총경도의 값 차이는 크지 않았다. 침전물은 소석회 주입량이 32 mg/l 일 때부터 발생하기 시작하였으며, 32 mg/l 이상일 경우 침전물량이 증가하는 경향을 보였는데, 이는 소석회 포화농도가 16 mg/l 이기 때문에 과투입으로 인해 용존되지 못한 소석회가 가열에 의해 탄산칼슘 침전물로 생성되기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 실공정에 적용함에 있어 가열에 의한 침전물 형성을 고려한다면 소석회 주입량은 32 mg/l 미만이 적절할 것으로 판단된다.

4. 결론

- 1) 정수장 현장에서 부식제어를 위한 소석회 포화수를 제조함에 있어 소석회 용해조의 교반시간은 60~75분,

Table 2. Variation of pH, alkalinity, and total hardness before and after heating of water treated with lime and CO₂

Condition Sample	Before heating			After heating			
	pH	Alkalinity	Total hardness	pH	Alkalinity	Total hardness	Precipitate
Filtered water	7.2	21.0	32.0	8.7	23.2	32.0	none
Lime 8 mg/l	7.8	27.0	38.0	8.9	30.0	40.0	none
Lime 16 mg/l	7.8	33.0	46.0	9.0	38.8	47.5	none
Lime 32 mg/l	7.8	46.0	59.5	9.0	57.8	62.0	a few precipitates
Lime 48 mg/l	7.8	55.5	72.0	9.0	62.6	73.5	lots of precipitates

포화기의 침전시간은 75~90분 정도를 유지하는 것이 소석회 포화수의 탁도를 2 NTU 미만으로 유지시켜 정수장 실공정에 영향을 주지 않을 것으로 판단된다.

- 2) 소석회의 용해도를 향상시키고 상등수의 탁도 및 pH 상승을 최소화하기 위하여 CO₂를 주입하는 경우, 가스상 형태의 CO₂를 직접 주입하는 방법과 CO₂ 포화수를 주입하는 방법에 따라 pH와 탁도에는 큰 차이가 없었으나, 실공정에 적용함에 있어 정수장 운영측면에서는 가스상 형태의 CO₂보다 CO₂ 포화수를 주입하는 방법이 정량주입이 더 용이할 뿐만 아니라 공정수의 pH 조절 또한 수월할 것으로 판단된다.
- 3) 소석회와 CO₂를 실공정에 적용함에 있어 탁도 측면에서는 CO₂를 먼저 주입하고 pH 측면에서는 소석회를 먼저 주입하는 것이 유리한 것으로 판단되며, 시차를 2분 이내로 유지하는 경우에는 소석회와 CO₂ 주입순서에 관계없이 상등수의 탁도를 0.2 NTU 미만으로 유지시킬 수 있을 것이다.
- 4) 소석회 주입량이 32 mg/l 을 초과하는 경우 가열에 의해 pH가 상승하고 탄산칼슘 침전물이 발생할 우려가 있으므로, 실공정 적용시 소석회를 32 mg/l 미만으로 주입하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

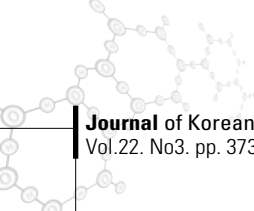


사사

본 연구는 수처리선진화사업단(환경부 ECO-STAR Project, I2WATERTECH 04-3)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 구성은, 우달식, 이두진, 김주환, 안효원, 문광순 (2006) 수질제어 및 부식억제에 의한 상수도관의 내부부식 제어, *상하수도학회지*, 20(2), pp. 215~223.
2. 광필재, 이현동, 남상호, 정원식 (2001) 국내 수계별 수돗물의 부식성 및 금속용출 특성 평가에 관한 연구, *대한환경공학회지*, 23(7), pp. 1195~1203.
3. 남상호 (2002) *국내 수돗물의 수질특성 및 방청제 관리현황*, 수도용 방청제 국제 워크샵, pp. 13~37
4. 이광호, 김용성 (1997) 급·배수관망에서 부식 및 녹물발생의 영향인자에 관한 연구(II), *대한환경공학회지*, 19(9), pp. 1167~1174.
5. 이현동, 정해룡, 광필재, 정원식 (2000) 정수의 pH 및 알칼리도



- 동시조절이 상수도관의 내부부식 제어 및 수질에 미치는 영향, *대한환경공학회지*, 19(7), pp. 661~669.
6. 한국수자원공사 (2004) *상수관로 최적 부식제어 기술개발 및 실공정 적용성 평가*, 한국수자원공사.
 7. AWWARF. (1996) *Internal Corrosion of Water Distribution Systems*, AWWARF and DVGW-TZW cooperative research report, Denver, CO.
 8. Sander, A, Berghult, B., Broo, A. E., Johansson, E. L. and Hedberg, T. (1996) Iron Corrosion in Drinking Water Distribution Systems—the Effect of pH, Calcium and Hydrogen Carbonate, *Corrosion Science*, 38(3), pp. 443~455.
 9. Sarin, P., Snoeying, V. L., Bebee, J., Jim K. K., Beckett, M. A., Kriven, W. M. and Clement, J. A. (2004) Iron Release from Corroded Iron Pipe in Drinking Water Distribution Systems: Effect of Dissolved Oxygen, *Wat. Res.*, 38(5), pp. 1259~1269.
 10. USEPA. (1984) *Corrosion Manual for Internal Corrosion of Water Distribution System*, USEPA, Washington, D.C.
 11. Volk, C., Dundore, E., Schiermann, J. and Lechevallier, M. (2000) Practical Evaluation of Iron Corrosion Control in a Drinking Water Distribution System, *Wat. Res.*, 34(6), pp. 1967~1974.