

상수도 배급수시설 부식방지를 위한 부식억제제 적용의 현안과 과제

글 안효원 _ 한국수자원공사 국제상하수도연구소 소장 / 우달식 _ 공학박사·(재)한국계면공학연구소 책임연구원

1. 서론

(1) 정수장 수질관리 차원에서의 부식억제제 적용의 배경

국민들이 안심하고 마실 수 있는 맑은 물 공급을 위하여 범정부적 차원에서 1997년부터 2011년까지 총 90조 8천억원의 막대한 예산으로 수자원 확보 및 공급 대책과 수질개선대책 등 물 관리 종합대책을 수립하여 시행하고 있으나 아직도 국민들의 수도물에 대한 불신은 없어지지 않고 있다. 국민들의 수도물에 대한 불신의 가장 큰 원인 중의 하나는 상수도 배급수시설의 부식으로 인한 수도물 중 적수, 탁수, 침전물질 그리고 맛·냄새의 발생 등 심미적 요인뿐만 아니라 철, 구리, 납 등 인체에 유해한 중금속 용출 등의 문제이다.

이와 같은 문제를 해결하기 위하여 정부에서는 16년 이상 된 노후 관 교체사업으로 1997년부터 2011년까지 3조 8,319억원을 투자하여 총 42,757km를 교체할 계획을 수립하여 진행 중에 있다. 그러나 이러한 노력으로 인해 수도물 수질의 향상이나 국민들의 수도물 불신 해소에 얼마나 기여했는지에 대해서는 어느 누구도 답변하지 못하는 것이 사실이다. 또한 수도관의 노후정도를 정확히 판단하고 실제 전국적으로 교체 가능한 노후수도관이 얼마나 되는지에 대한 정확한 조사연구는 아직까지 없는 상황이고, 노후상수도관 교체사업의 효과 및 타당성 평가도 제대로 되지 않은 상태에서 막대한 경제적 손실이 발생할 수 있는 노후관의 교체 사업만이 주요 대안이라고 주장하기에는 다소 무리가 따르지 않을 수 없다.

미국에서는 최근 수도관을 플라스틱관, PVC관으로 교체하자는 주장들이 제기되고 있는데, 이들 관에서는 어떤 경로에서 발생되는지는 정확히 밝혀지지 않았지만, EPA에서 규제하고 있는 Organotin 등이 용출되고 있다는 보고도 있다. 현재 우리의 노후상수도관 교체사업이 그렇다고 볼 수는 없지만, 만일 충분히 검토되지 않은 상태에서 새로운 관으로 교체한다면 전 국민을 대상으로 임상 실험을 하는 것과 별반 무슨 차이가 있겠는가? 미국에서

는 약 600만명이 Polybutylen Pipe를 사용하고 있는데, 관련업체에서는 당초 100년을 사용할 수 있다고 장담하였으나, 5년도 사용하지 못한 현재 많은 문제점이 노출되어 수조 달러의 소송이 걸려 있는 상태이다. 따라서 현재의 관이 문제가 있다하더라도 계속 보완 유지하고 새로운 관에 대한 충분한 실험연구 검토가 이루어진 후에 관 교체 사업이 이루어져야 하는데, 우리의 실정은 실효성에 다소 의문이 있을 수 있는 엄청난 예산의 관 교체사업만이 전부인 것처럼 추진되고 있는 것은 참으로 안타까운 일이다.

정수장에 부식억제제(국내에서는 그동안 방청제라고 명명하여 왔으며, 부식방지제라고도 불림)를 사용하고 있는 미국의 필라델피아 시에서는 200년 이상 된 상수도관을 현재까지 사용하고 있으며 1900년 이전에 매설된 상수도관이 70%나 있다고 한다. 이는 수도관의 부식방지 및 적정관리가 정수장 관리와 함께 국민들에게 안심하고 마실 수 있는 수도물 공급을 위한 주요한 대책임을 알 수 있다. 그러나 이렇게도 현재 대부분의 국내 정수장의 경우 부식억제에 대한 구체적인 해결 방안은 거의 없는 실정이다.

상수도 관로의 부식 방지 기법으로는 도복장강관의 부식을 방지하기 위한 전자기식 방법(음극법 및 희생 양극법), 노후관로의 관 갱생 및 교체 방법, 관이나 수질특성 등을 고려한 pH 및 알칼리도 조절 방법, 배급수 시설에 부식억제제의 주입방법 등이 있다. 이들 여러 부식억제 기법 중 미국 등 선진외국에서 가장 손쉽고 효과적이며 광범위하게 정수장에서 적용되고 있는 것이 부식억제제(Corrosion Inhibitor)이다. 미국 수도협회(AWWA) 2004년 2월 호에 게재된 향후 미국 수처리제의 사용 전망보고에 따르면 2002년 미국의 수처리제 중 부식억제제의 이용이 소독제, 응집제, 기타의 수처리제 중 가장 많은 935million 달러에 달하며, 매년 그 사용량이 4.5% 증가하여 2007년에 1,135million 달러가 될 것으로 예측한 바 있다.

부식억제제는 순도가 높고 비교적 수중 용해가 잘되는 물질로 제조해야 되나 국내에서는 제도적 장치가 아직까지 미흡하여 원료의

관리와 제조에 대해 규제할 근거가 마땅히 없는 것이 현실이다. 부식억제제의 부식방지 효과 여부를 결정하는 주요 인자는 부식억제제의 형태와 농도, 관망에서의 수질, 관재질 등이 있는데, 환경부에서 고시된 부식억제제(환경부 고시에는 방청제라고 함)의 주입 농도는 부식억제제의 효과나 유해성의 검증 연구가 이루어지지 않은 채 10mg/L를 넘지 않도록 일률적으로 규정하고 있다. 그 적용에 있어서도 정수장의 수질관리 차원으로 다루어지고 있는 것이 아니라 수도물 이용자들이 아파트, 연립주택 등 공동주택의 저수조 후단에서 제한적으로 적용하고 있고, 이 또한 관리자들의 전문 지식 부족으로 관리가 제대로 되지 않고 있다.

(2) 정수장 수질관리 차원에서의 부식억제제 적용의 필요성

상수원수의 수질향상 및 정수처리 공정개선은 지금까지 매우 중요한 이슈로서 수많은 예산과 인력을 투자해 온 것이 사실이다. 그러나 아무리 양질의 수도물을 정수장에서 생산한다 하더라도 가정으로의 공급과정에서 제기되고 있는 수도물 2차오염의 문제로 인해 수도꼭지에서의 수질은 전혀 개선되고 있지 않으므로 이제부터는 배급수시스템의 연구 개발에 투자를 아끼지 않아야 할 시점이다.

상수도 배급수관망 부식의 문제는 가정의 수도꼭지에 적수 및 맛·냄새 등을 유발하고 납, 구리 등 중금속이 용출될 수 있으며, 상수도 시설물에 대해서도 막대한 손실을 가져오게 한다. 이미 일부 소규모 정수장의 경우 부식된 시설물과 금속관종의 노후로 인해 수도관내 처리수로 외부의 오염 물질이 유입되고, 누수·단수 등의 문제까지 가져오는 실정이다. 그러나 대부분 국내 정수장의 경우 부식 문제에 대한 구체적인 해결방안은 거의 없는 실정이다. 미국, 서구유럽 등 선진외국에서는 수도관 부식 방지 기법 중 순도가 높고 비교적 수중 용해가 잘 되는 물질로 제조한 부식억제제를 광범위하게 정수장 차원에서 적용하고 있다. 일반적으로 국내 정수장에서는 부식억제제를 사용하지 않고, 고체상의 부식억제제(일명 방청제라고 불리우고 있음)를 아파트 등의 저수조를 통해 관내로 유입시키는 방법만을 이용하고 있다. 따라서 배급수관의 부식과 관련된 제반문제는 제어가 어렵고, 계절적인 온도변화에 의해 부식억제제가 사용 직전의 수도물에 균일하게 용해되지 않아 잔류 농도가 지나치게 높거나 또는 낮게 유지되는 등 이용상의 문제점이 지적되고 있다.

최근의 부식억제제 개발동향은 양극 부식억제제와 음극 부식억제제의 적절한 혼합에 의한 시너지 효과를 이용하는 것이다. 이와 같은 원리에 의해 개발된 부식억제제는 기존 단일성분의 인산염계 또는 규산염계의 부식억제제보다 그 주입량을 획기적으로 감소시키면서도 만족스러운 효과를 얻을 수 있다.

정수장의 부식억제제 적용은 새로운 약품을 사용하는 것이 아니다. 이는 우리나라 대부분 공공주택, 대형 빌딩 등에서 이미 개별적으로 무계획적이고 관리가 소홀한 상태에서 주입되고 있는 부식억제제를 정수장차원에서 정확하고 균일하게 관리·주입함으로써 신뢰할 수 있고 만족할 만한 먹는물 공급대책의 일환으로 적극 권장할 만한 정책인 것이다. 미국의 경우 1991년 LCR(Lead & Copper Rule) 제정 이후 동과 납의 허용농도를 각각 1.3, 0.015mg/L로 강화함에 따라 이 기준을 만족시키면서 동시에 부식현상을 효과적으로 감소시킬 수는 있기 때문에 거의 대부분의 정수장에서 부식억제제를 사용하고 있다. 우리나라에서는 납관을 사용하지 않는다고 해서 부식억제제를 사용하지 말아야 한다고 주장하는 것은 넌센스다. 우리나라의 경우 상수도관의 용접부위에 납을 많이 이용하였으며 예전에 사용된 납관이 아직도 곳곳에서 발견되고 있으므로 납 문제가 전혀 없다고 볼 수 없으며, 또한 미국보다도 훨씬 부식성이 강한 수질특성을 가지고 있으며 특히 적수문제가 심각하므로, 동과 납뿐만 아니라 적수 방지 대책을 위해서라도 반드시 인체에 전혀 해롭지 않은 부식억제제를 정수장 차원에서의 적용할 수 있도록 적극적으로 검토해야 할 것으로 생각된다.

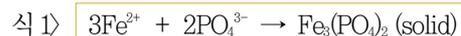
따라서 본고에서는 상수도관 부식으로 인한 수도물의 2차 오염 문제와 적수, 맛·냄새를 근본적으로 해결하기 위해 정수장의 수질관리차원에서 부식억제제 적용에 필요한 외국의 사례 및 현안과 과제에 대하여 고찰하고자 하였다.

2. 부식억제제의 종류 및 특징

부식억제제(Corrosion Inhibitor)란 수도관이 부식됨에 따라 중금속의 용출 등으로 수도물이 오염되는 것을 방지하기 위해 첨가되는 약품이다. 현재 이용 가능한 부식억제제로서는 성분에 따라 크게 인산염계(Orthophosphate, Polyphosphate), 규산염계(Silicate), 그리고 혼합염계(Phosphate Blend, Phosphate Silicate Blend)로 나눌 수 있으며 그 특징은 표 1)과 같다.

(1) 정인산염(Orthophosphate)

정인산염(Orthophosphate)은 Fe^{2+} 와 같은 용해된 금속이온과 불용성의 염을 생성하여 양극부위에 피막을 형성한다.



위 반응의 결과 금속의 용해도는 감소하게 된다. Ferric Orthophosphate는 다른 양극 부식방지제에 비하여 부착력이 강

부식억제제	화학식	방식위치	특징
Orthophosphate	H ₃ PO ₄ NaH ₂ PO ₄ Na ₂ HPO ₄ Na ₃ PO ₄	Anode	- 칼슘이온이 많은 경우, 효과적으로 보호 피막을 형성 - 여러 관종에서 부식 효과가 관찰됨
Polyphosphate	Na ₅ P ₃ O ₁₀ (NaPO ₃) ₆	Cathode	- Polyphosphate가 Orthophosphate로 전환될 때 효과가 있음 - CaCO ₃ 나 CaSO ₄ 등의 생성을 억제 - 세관 후 고농도로 주입하는 것을 권장하고 있음
Bimetallic Phosphate	ZnSO ₄ + H ₂ O + NaH ₂ PO ₄ + H ₃ NO ₃ S	Anode +Cathode	- Phosphate : Anode sequestering - ZnSO ₄ : Cathode sequestering
Phosphate Blend	Orthophosphate + Polyphosphate	Anode +Cathode	- Orthophosphate : 부식억제효과 - Polyphosphate : Sequestering효과 - Orthophosphate가 고비율시 효과적이라고 알려져 있음 - 대부분 상용화된 제품
Silicate	Na ₂ SiO ₃ Na ₆ Si ₅ O ₇	Anode	- (mSiO ₂ , nSiO ₃) ²⁻ 와 같은 콜로이드 음이온으로 작용 - pH가 낮고 용존산소가 높은 수질에서 처리하기 적당하다고 알려져 있음
Phosphate Silicate Blend	Phosphate + Silicate	Anode	- 두 물질간의 상승작용으로 단일성분일 때 보다 부식억제 효과가 큼

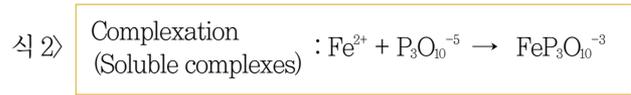
표 1) 부식억제제의 종류별 특징

하고, 수질의 pH에 영향을 받지 않는 피막을 형성한다. 정인산염은 Calcium과 결합된 스케일이 형성될 가능성이 크기 때문에 단독으로는 거의 사용하지 않는다. 정인산염은 나트륨과 함께 일인산나트륨(NaH₂PO₄), 이인산나트륨(Na₂HPO₄), 삼인산나트륨(Na₃PO₄) 등의 화합물로 만들어 지며, 2가 금속의 방청제로 아연과 함께 사용되거나 단독으로 사용되기도 한다.

(2) 다중인산염(Polyphosphate)

다중인산염(Polyphosphate)은 음극 부식억제제(Cathodic Corrosion Inhibitor)로 전해석출(Electrodeposition) 메카니즘에 의해 일반 금속의 음극 표면에 튼튼한 분극막(Polarizing Film)을 형성한다. 이 분자는 콜로이드성 입자를 형성하기 위해 칼슘이온과 결합하거나 흡착하며, 양으로 하전된 이 입자들은 금속의 음극으로 이동하여 막(Film)을 형성한다. 다중인산염은 중합도에 따라 금속이온에 대한 결합력, 금속염의 용해도, 방청제로서의 효과 등이 다르지만, 일반적으로 칼슘이온 등의 2가 이온과 공존할 때 양호한 부식방지효과를 나타낸다. 다중인산염은 스케일 방지제의 역할도 수행하며, 음용수 처리시 상수관 내부의 철(iron)을 안정화시켜서 붉은 녹물과 같은 적수문제를 제거해 주기도 한다. 기존 국내에서 시판되고 있는 고체형의 부식억제제(방청제라고 불리는 제품)은 대부분 정인산을 고온에서 용융시켜 제조하는 과정에서 성

분이 Hexametaphosphate와 같은 다중인산염으로 변하게 되는 과정을 거치는데, 이들 다중인산 이온은 수중의 철 이온과 만나 아래의 식 2)와 같은 용해성의 착염이온을 형성하게 된다.



이 과정에서 형성된 FeP₃O₁₀⁻³는 수중에 이온상태로 존재하는 Fe²⁺ 등으로 인해 발생되는 적수현상을 일시적으로 없애주어 적수 방지에 효과가 있는 것으로 보이지만, 결국 수중에 계속 용해된 상태로 존재하여 이들 이온들이 수도꼭지까지 운반될 가능성이 있어 음용수의 안전성에 위협을 줄 수 있을뿐만 아니라 근본적인 부식 방지는 어려운 것으로 판단된다. 즉, 현재 국내에서 대부분 다중인산 이온의 형태로 사용되고 있는 고체형 방청제는 철에 의한 적수 발생을 원천적으로 없애주는 것이 아니고 일시적인 착시현상을 일으켜 수중에서 녹물이 없어지는 것처럼 보일 뿐 실제로는 철이 용해되어 결국 수도물 안에 존재하고 있는 것이다. 다중인산염 사용시 문제점은 Phosphorous-oxygen 결합의 가수분해로 인하여 다중인산염 구조가 부식방지 작용을 할 수 없는 약한 양극형 부식방지제(Anodic Inhibitor)인 정인산염(Orthophosphate) 분자로 전환되고, 어떤 경우에는 칼슘과 정인산염이 반응하여 스케일을 생성하

여 그 결과 오히려 부식을 촉진시킬 수도 있다. 다중인산염은 Ca 농도, 체류시간, pH, 온도 등 여러 가지 요인에 의해 정인산염(Orthophosphate)으로 분해된다. 배급수관망에서 모든 다중인산염은 불안정하여 서서히 가수분해되거나 또는 정인산염으로 전환된다. 칼슘농도가 증가함에 따라 정인산염을 생산하는 비율은 증가한다. 칼슘이 없을 경우 24시간 후 10% 이하로 전환되는데 칼슘농도가 120mg/L 일 때는 70% 이상 증가된다. 따라서 다중인산염과 정인산염이 공존하는 환경에서는 오히려 부식효과가 개선되며, 기준치내에서 사용하는 한 인산칼슘에 의한 스케일의 문제는 나타나지 않는다. 그러나 수온이 높은 경우에는 분해된 정인산염에 의해 인산칼슘의 피막이 두꺼워 스케일화되는 경우가 있으므로 인산칼슘의 석출억제효과가 뛰어난 스케일 방지제를 사용할 필요가 있다. 다중인산염은 현재 가장 많이 사용되고 있는 방청제로 독성이 없고 침식이 일어나지 않는다는 장점이 있다. 다중인산염은 모두 인산과 소다회, 가성소다 등과 혼합하여 삼인산나트륨($\text{Na}_3\text{P}_3\text{O}_{10}$), 육인산나트륨($\text{Na}_6\text{P}_6\text{O}_{24}$), 기타 다인산나트륨, 다인산칼륨 등의 화합물로 만들어 진다. 물의 pH는 인산염에 의해 형성된 보호피막의 성질에 영향을 미치는데 정인산염을 피로인산염과 비교하면 정인산염은 pH가 중성 부근에서 더욱 높은 방식 효과를 나타내며 높은 pH에서 유리상 다인산염 보다 강관에 대한 보호작용이 우수하다. 인산염은 전해질이나 용존고체의 농도에는 비교적 민감하지 않지만 물의 부식성이 증가함에 따라 방식효과를 일정하게 유지하려면 인산염의 주입량도 증가시켜야 한다.

(3) 규산염(Silicate)

규산염(Silicate)은 금속의 양극부위에서 용해된 금속염과 결합한다. 이때 생성된 금속염과 규산염의 결합체는 양극부위에 겔(Gel)상의 석출물 층을 형성한다. 이렇게 형성된 겔상의 층은 다른 부식억제제에 의하여 형성된 부식방지 피막에 비해 화학적으로 대단히 안정하다. 규산염의 부식방지기능은 수온이 높을수록 향상된다. 규산염은 계면활성 기능이 있으므로 Tubercle 내부로 확산되어 부식을 방지하는 기능이 있다. 규산나트륨(Sodium Silicate)은 물에서 가수분해되어 음전하를 띠는 콜로이드성 입자로 변한 후 양극지점(Anodic Area)으로 이동하여 막을 형성한다. 이 막의 형성은 배관내부의 부식생성물 위에 이루어져서 최종적으로 이 부식생성물은 겔이 되며, 이러한 과정은 부식 생성물이 더 이상 없으면 멈추어 버리기 때문에 Self-limiting하다. 규산나트륨은 무수화합제 또는 액체 규산염 용액 등의 몇가지 형태가 있다. 무수형태의 규산염은 Na_2SiO_3 , $\text{Na}_6\text{Si}_2\text{O}_7$, $\text{Na}_2\text{Si}_3\text{O}_7$ 등이 있으며, 규사와 함께 탄산나트륨을 녹여서 만든다. 가압하여 가열하면 Na_2O 와 SiO_2 의

비율이 다양한 용해성 규산염이 생성된다. 규산염은 pH가 낮거나 용존산소농도가 높은 경우 사용하는 것이 좋고 규산염의 주입량도 4~14mg/L정도로 유지하는 것이 좋다. 그러나 수온이 높고 경도, 염소이온, 총용존고형물농도가 높은 물에는 많은 농도를 주입해야 한다. 규산염계 부식억제제의 경제성을 높이기 위해서는 가성소다나 소다회를 이용하여 pH를 7.5~8까지 증가시킨 후 사용하는 것이 바람직하다. 그러나 낮은 농도에서는 양극 방식제이기 때문에 공식을 유발하는 경향이 있다.

(4) 아연(Zinc)

아연(Zinc)은 음극방식(Cathodic Protection)의 기능을 하며, 철의 전위를 불활성화시켜 부식을 방지하는 역할을 한다. 음극방식은 갈바니 부식의 원리를 이용한 것으로, 부식되고 있는 금속을 갈바니 전지에서 음극이 되게함으로써 부식을 방지하는 것이다. 아연도강관은 음극방식의 대표적인 예이다. 강에 피복된 아연이 선택적으로 부식됨으로써 강을 보호하게 된다. 이온화 경향, 즉 부식 경향이 더 큰 철보다 기전력이 작은 아연이 희생양극(Sacrificial Anode)으로서 작용하게 되어 철 대신 아연이 용출되어 철의 부식을 막는다. 아연은 단일 성분으로 사용하여도 OH^- 이온과 침전반응에 의해 막을 형성할 수 있지만, 정인산염이나 다중인산염과 함께 사용할 때 최적의 효과를 가질 수 있다. 수중에 용해된 상태로 존재하는 Zn^{2+} 는 금속의 음극부위에서 생성되는 OH^- 이온과 결합하여 불용성인 $\text{Zn}(\text{OH})_2$ 를 형성하여 음극 부위에서 전기적 부도체인 피막을 형성하고, 산소의 투과를 저해하여 음극 반응속도를 저하시킨다. 아연을 인산염 등의 다른 조성물과 혼합하여 사용하게 되면 극소량의 낮은 아연 농도에서도 우수한 금속 부식방지 효과를 달성할 수 있다.

3. 외국의 부식억제제 적용 사례

미국에서 주로 사용하고 있는 부식 방지법은 정수장에서 정수과정 중 부식억제제의 주입을 통하여 이루어지고 있다. 미국에서 가장 많이 사용하는 부식억제제는 1930년 이래로 사용되어 왔으며, 탄산칼슘 침전과 철의 부식을 동시에 제어할 수 있는 Hexametaphosphate가 1940년대부터 사용되기 시작했다. 오늘날 보편적으로 사용되는 인산염계 부식억제제의 종류로는 Hexametaphosphate(Polyphosphate), Orthophosphate, Zinc Orthophosphate, Zinc metaphosphate, Bimetallic phosphate(Sodium Zinc or Potassium Zinc Phosphate) 등이 있다. 인산염계 부식억제제는 탄산칼슘의 스케일 방지를 위해서가 아니라 망간과 아연, 철 그리고 납이 용출되는 것을 막아 부식을 저

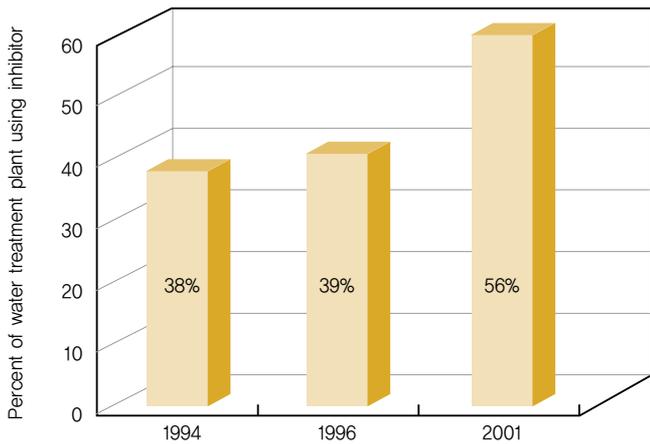


그림 1) 미국 정수장의 부식억제제 사용 비율

감시하기 위해서 사용한다. 미국 상수도에서 부식억제제를 사용하는 비율은 그림 1)에서 보듯이 2001년 전체 정수장 중 56%가 이용 되는 것으로 보고되고 있으나, 2004년 현재 일부 정수처리체계가 미흡한 정수장이나 지하수를 원수로 사용하는 몇몇 정수장을 제외

하고는 거의 대부분의 정수장에서 부식억제제를 이용하고 있다. 미국의 미네소타 주에서는 약 2mg/L의 다중인산염을 첨가하여 철염 또는 철 부식 용출물로부터 나타나는 적수 현상을 감소시키고, LCR 규정을 만족시킬 수 있었다고 보고한 바 있다. 국내 수질과 유사한 연수지역에서는 규산염을 4~15mg/L 주입하여 납과 구리의 부식에 의한 Blue staining의 방지에 효과가 있었으나, 이 방법은 상대적으로 고농도로 주입되므로 상수도의 배급수관에서 사용되기에는 경제성에 문제가 있는 것으로 보고 되고 있다. 펜실베이니아주 필라델피아수도국에서는 방대한 배급수관망의 부식 방지를 위해 지난 수십년동안 여러 종류의 부식억제제 제품에 대한 실험을 다양하게 연구하여 EPA의 LCR(Lead and Copper Rule)과 펜실베이니아 주정부의 규제법을 만족할 목적으로 정수장에서부터 부식방지기법을 적용하기 위한 Desk-top 평가, Piperack, Jar-testing을 실시 하였다. 1950년 대 부터 Sodium Hexametaphosphate를 이용하여 부식제어를 시도해 배수지에서 조류가 번성하는 문제가 발생한 1973년 이후에는 Belmont와

지역	부식억제제 및 주입농도	주요 결과	
미국	Public Water System in Minnesota	- Zinc Phosphate - Sodium Silicate - Ortho-polyphosphate Blend	- Poly:Orthophosphate = 1:1로 1~2mg/L 주입시 구리의 농도가 50% 감소
	Springfield Massachusetts Water System	- Alkalinity & pH Control - Ca-Hardness Control - Phosphate, Silicate 첨가 - H ₃ PO ₄ + NaOH로 pH 조절	- 20mg/L Silicate 첨가시 만족할 만한 납 농도 제어 - Orthophosphate 사용으로 납 용출 감소 - H ₃ PO ₄ + NaOH 사용시 부식제어 효과 큼
	City of Portland	- Sodium Orthophosphate - Zinc Orthophosphate - Silicate - Silicate Polyphosphate Blend	- Sodium Orthophosphate와 Zinc Orthophosphate가 부식속도와 금속의 용출을 효과적으로 감소 - Silicate는 pH 7.5에서 납과 구리 부식을 효과적으로 조절 - Silicate Polyphosphate Blend는 구리농도를 감소시키나 납의 농도는 Silicate를 단독으로 사용할 때보다 더 높았음
	Philadelphia Suburban Water Company	- Caustic Soda로 pH 조절 - Lime 18mg/L (as CaCO ₃) - Bimetallic Phosphate : 0.8~0.9mg/L	- pH 조절 및 Lime Stabilization은 납과 구리 농도 감소에 효과적임 - Phosphate 주입시 납의 농도변화는 적었으며 구리의 농도감소는 확인됨
	Wisconsin Utilities (Madison, Monona Janesville)	- Polyphosphate - Polyphosphate Blend	- 수도관에서 부식제어를 위한 Polyphosphate의 이용 검토
캐나다	City of Laval(Quebec)	- Ortho-polyphosphate Blend - Orthophosphate Blend - Zinc Phosphate	- 부식억제제가 미생물에 미치는 영향 검토 - Phosphate의 주입이 HPC에 미치는 영향이 없었음

표 2) 미국과 캐나다에서의 부식억제제 관련 연구 요약

Queen Lane 정수장에 부식제어 약품으로 mild steel coupons의 부식억제에 효과가 있는 Orthophosphate를 사용하게 되었다. Baxter 정수장은 1993년까지 정수의 pH를 8.0에서 8.2로 유지하였으며 1993년 이후로는 Zinc Orthophosphate를 사용하게 되었다. 미국과 캐나다에서의 부식억제제 관련 연구를 요약하여 표 2)에 나타내었다.

저자는 미국 버지니아주의 3개 정수장을 방문하여 방청제 이용 현황을 조사하였으며, 이를 정리하여 표 3)에 제시하였다.

지역	부식억제제 및 주입농도	Results
Richmond	- Zinc Orthophosphate 주입	- LCR 제정 이후 Pipe Loop Test 실시한 결과를 참고하여 주입해야할 부식억제제 (Corrosion Inhibitor) 결정
	- TP 1.9mg/L 주입	
Blacksburg	- Zinc Orthophosphate 주입	- 납 용출 억제 효과, 미생물 재생장 감소 효과
	- 2mg/L 이하	- 주입장소는 소독 공정 후단
Roanoke	- Orthophosphate 주입	- 대부분이 부식억제제 (Corrosion Inhibitor) 사용
	- 2mg/L 이하	- 정수장 약품 전체비용 중 10% 미만

표 3) 미국 버지니아주 3개 정수장의 부식억제제 이용 현황

미국 버지니아의 주도인 Richmond 정수장의 부식억제제 이용 현황을 살펴보면, Richmond시의 급수인구는 약 60만명이며, 수돗물 생산량은 90million gallon/day이다. 지금부터 7~8년 전에는 부식억제제를 사용하지 않았는데, 1991년 LCR(Lead & Copper Rule)이 제정된 이후 수돗물의 납과 동의 기준을 맞추기 위해

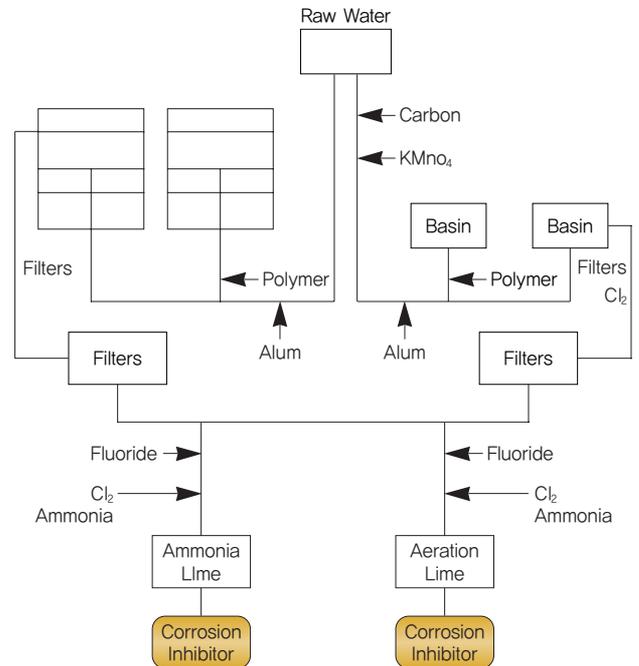


그림 2) 리치먼드 정수장의 정수처리 계통도(부식억제제 주입 지점)

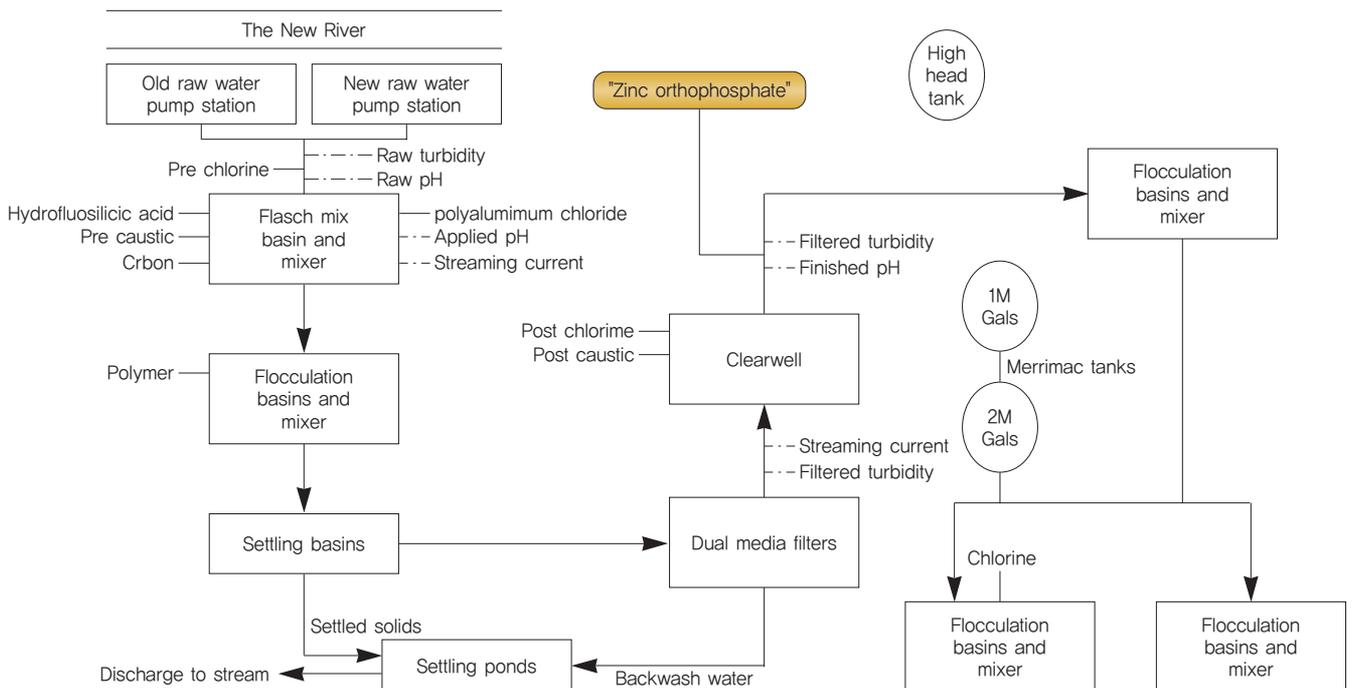


그림 3) 블랙스버그 정수장의 정수처리 계통도(부식억제제 주입 지점)

Pipe Loop Test를 실시한 후 최적의 부식억제제로 선정된 Zinc phosphate 계통의 부식억제제를 사용하기 시작하였다. 처음 부식억제제 도입 초기 시민들의 반응은 미국 EPA가 주도적으로 권장하는 상태였고, 수도물 중 납의 용출량이 기준을 초과하던 것이 기준에 적합하게 되어 매우 환영하는 분위기였다고 한다. 단지 Test 초기 부식억제제 주입 후 저녁 8시간 동안 가정에서 수도물 사용을 금지시켜 불편했다는 것 이외에 더 이상의 불편사항은 없었다. 부식억제제 사용을 위한 준비기간은 Test 1년, 예산을 신청하여 약품 저장조, 약품 등을 구매하는데 1년, 총 2년이 소요되었다. Richmond 정수장의 부식억제제 주입장소는 소독공정 후단으로 그림 2)에 나타낸 바와 같다. 그림 3)은 버지니아에 있는 Blacksburg 정수장의 흐름도이며, 소독공정 후단에 Zinc Orthophosphate를 주입하고 있다.

배급수관망에 첨가되는 부식억제제는 먹는 물과 직결되는 화학약품인 만큼 인체에 미치는 영향에 대해서도 신뢰할 수 있는 과학적인 평가가 필요하다. USEPA에서는 규산염계 부식억제제에 함유된 나트륨의 과량 섭취는 심장병을 유발시킬 수 있기 때문에 먹는 물에서 20mg/L 이하로 규제하였다.

독일 등 유럽에서도 규산염계 20mg/L 이하, 인산염계 5mg/L 이하로 최대허용농도를 규제하고 있다. 일본의 경우 이미 인산염의 일일 허용 섭취량이 마련되어 있고, 일본수도협회(JWWA)에서는 폴리인산 염류에 대해 규제하고 있다.

4. 정수장의 수질관리 차원에서 부식억제제 적용의 현안과 과제

수도물 부식성은 관로시설에서 적수의 발생, 누수, 파손 등을 발생시켜 물 수송체계를 마비시키는 역할을 할 뿐만 아니라 국민건강에 위협이 되고 있다. 우리나라의 상수원수는 거의 대부분 경도와 알칼리도가 낮은 연수로서 수도관내부의 보호피막을 형성하지 못해 침식성과 부식성이 강하여 상수도관의 부식으로 인한 수도물의 적수 및 맛·냄새를 유발하며, 이들의 민원발생건수가 전체의 1/3에 달하고 있어 국민들의 수도물 신뢰회복에 큰 장애물이 되고 있다.

따라서 본고에서는 급수관뿐만 아니라 송·배수관의 부식방지 및 노후수도관의 부식 방지를 통해 수도물의 2차오염 문제와 적수, 맛·냄새를 근본적으로 해결하여 안전한 수도물 공급에 기여하기 위해 선진외국에서 광범위하게 사용되고 있는 부식억제제를 정수장 수질관리차원에서 적용하기 위한 현안과 과제에 대해서 다음과 같이 생각해 보았다.

(1) 부식억제제의 주성분에 대한 안정성을 확인해야 한다

정수처리에 사용되는 모든 수처리 약품의 과다투여는 인체건강에 영향을 미칠 수 있으며, 부식억제제 또한 과다투여시 인체 안전성에 주의가 요구되기는 마찬가지이다. 현재 가장 많이 사용되고 있는 인산염 및 규산염계 부식억제제의 모든 구성 성분은 식품첨가물 공전에 지정되어 있어야 한다. 참고로 세계보건기구(WHO)에서 지정한 인산염의 1일 섭취허용량은 3,500mg P/day이며, 일본에서 지정하고 있는 인의 1일 추정섭취량은 1,500mg P/day이다. 또한 인산염계 부식억제제가 정수처리시 사용되고 있는 응집제, 소독제와의 반응으로 인해 또 다른 부산물의 생성여부도 확인해야 한다.

(2) 부식억제제의 주성분인 인산염이 수계 부영양화에 미치는 영향을 고려해야 한다

부식억제제의 주성분인 인산염이 수계 방류시 부영양화에 대한 우려가 적지 않다. 호주에서는 인산염에 의한 부영양화를 우려하여 부식억제제 사용에 있어 아직도 결정을 유보하고 있는 상태에 있다. 그러나, 인산염이 상수도관 내부에서 피막 형성에 이용되게 되면 최종 수도꼭지에 유출되는 인산염은 매우 극소량이 될 것이며, 이에 대한 걱정 주입농도의 결정은 따라서 매우 중요한 설계 인자가 된다. 만일 수도꼭지 수도물에서 인산염의 농도가 다소 검출된다면 이때에는 하수처리와 관련하여 생각해 볼 필요가 있다. 우리나라는 2008년부터 전국 하수종말처리시설의 방류수 중 총인 농도를 2mg/L로 규제함으로써 인제거가 필수적으로 이루어질 것이며, 따라서 2008년 이후에 인산염계 부식억제제의 적용은 큰 무리가 없을 것으로 기대된다. 다른 각도에서 생각해 볼 때 기존의 아파트, 빌딩에서 이용되고 있는 고체형 인산염계 부식억제제가 P₂O₅ 함량기준으로 10mg/L 정도로 이용하고 있는데, 정수장에 적용하게 되면 이보다 약 5배 이상 적은 농도로 투입이 가능하고 관 내부에서 모두 소모된다면 정확한 실태조사가 이루어져야 하겠지만, 인산염의 수계 방류량은 우려할 사항이 아닐 수도 있다고 생각된다. 또한 인산염에 의한 배급수관망 내에 미생물 재생장 여부도 정확히 파악해야 할 것이다.

(3) 부식억제제 사용에 따른 경제적 효과에 대해서 검토해야 한다

부식억제제를 정수장에서 사용함에 따라 신설 상수도관 및 노후 상수도관의 사용주기 연장측면과 대비되는 경제적 효과를 정확히 산출해야 할 것이다. 서론에서도 언급하였지만 16년 주기로 반복될 수 있는 노후상수도관 교체사업을 최소화할 수 있는 방안이라면 정수장에서 상수도관의 부식관리가 되어야 하며, 아직까지 국민들의 정서상 수도물에 약품을 투여한다는 측면에서 부정적인 면

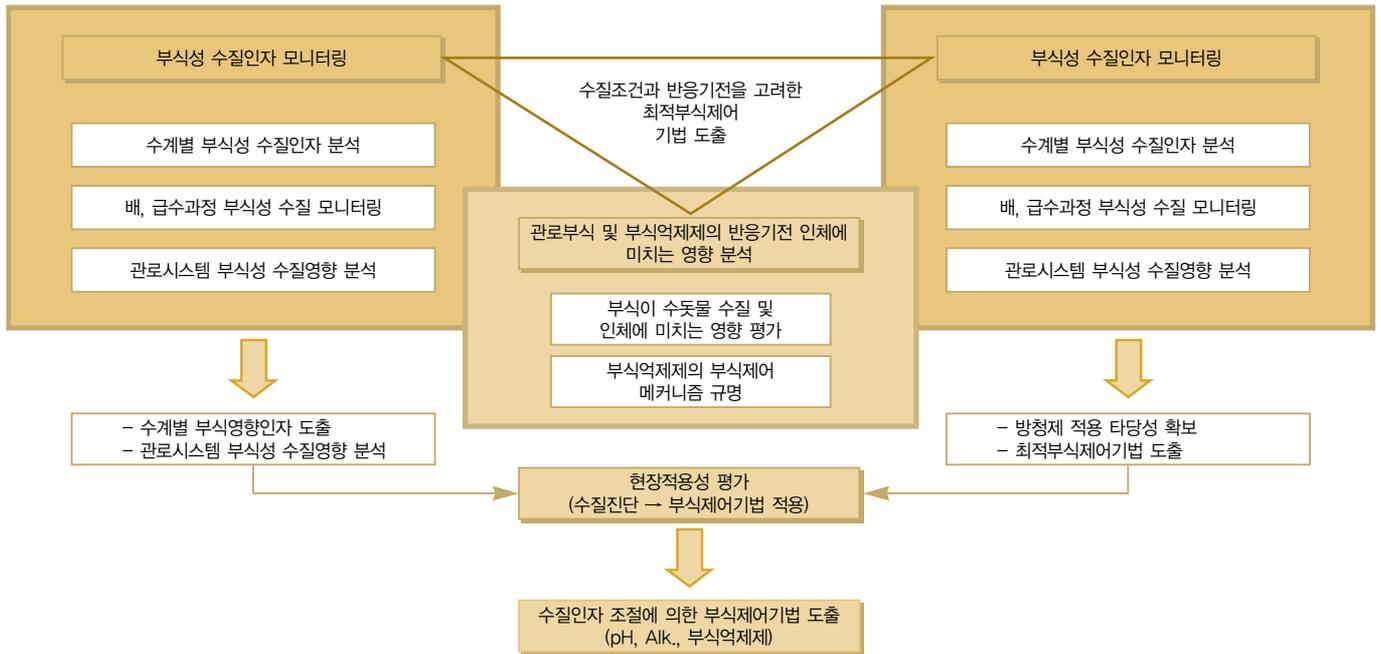


그림 4) 부식억제제 적용을 위한 연구내용 및 추진체계

이 다소 있기는 하지만, 선진국의 예에서 보듯이 가장 효과적인 방법이 바로 부식억제제의 적용이라고 생각이 된다.

(4) 부식억제제 적용을 위한 법률적 검토 작업이 필요하다

현재 부식억제제 사용과 관련된 국내 관련 법규는 1986년 10월 29일 제정된 일본의 방청제 품질규격을 원문 그대로 번역하여 제정된 방청제 규격기준으로, 일본의 기준은 그 이후 1991년 3월 26일 일부 수정되었으나, 국내 방청제의 규격기준은 1986년 제정된 일본의 기준 골격을 그대로 유지하다가 2002년 12월 9일 환경부 고시 187호에서 방청제 규격기준의 일부가 개정되었으나, 이 또한 1991년도 개정된 일본의 기준과 비교해서도 다소 상이하다. 즉 우리나라의 방청제 품질규격 중 P₂O₅ 함량이나 SiO₂ 함량은 일본과 다르며, 정인산염과 pH 항목의 경우 일본은 아예 삭제되어 있다. 따라서 우리나라도 pH 항목은 실제 적용 시 희석되어 영향을 거의 미치지 않으므로 일본과 마찬가지로 삭제되어야 할 것이다. 또한 정수장에 방청제의 이용을 위해서는 사용기준에 있어서 “음용수에 첨가하는 방청제의 농도는 급수관의 부식을 방지하기 위한 최저농도이어야 하며 ~”에서 급수관을 상수도관 또는 배급수관으로 바꾸어야 할 것이다. 일본에서 급수관의 부식방지를 목적으로 하는 사용된 방청제라는 용어는 우리나라 한자에도 없는 용어로서 부식억제제(Corrosion Inhibitor) 또는 부식방지제로 변경되어야 하며, 관련 규정을 전면적으로 재 검토해야할 필요가 있다고 사료된다.

5. 결론

국민에게 안전하고 맛있는 수돗물 공급을 위해 필수적으로 뒤따라야 할 사항은 원수의 수질관리, 정수장의 고도처리 못지않게 상수관로의 수질관리인데, 현재까지 검토된 상수도 배급수계통에서의 수질관리의 핵심은 상수도관의 내부부식을 최대한 제어하는데 있다. 이를 위해서 한국수자원공사에서는 그동안 pH, 알칼리도, 경도와 같은 수질인자 조절 및 부식억제제 주입에 의한 관부식억제 연구를 꾸준히 수행해왔다. 우리나라 수돗물의 원수 수질특성이 대부분 연수로서 강한 침식성과 부식성을 띄고 있어 pH, 알칼리도, 경도와 같은 수질인자의 조절에 매우 제한적일 수밖에 없으며, 부식억제제의 사용에도 상기 언급한 여러 가지 현안과 과제가 뒤따르고 있으므로 성급히 적용하기 보다는 다양한 검토가 전제된 후 상수관로에 대한 최적의 부식제어 기법이 도출되어야 할 것이다. 이에 따라 한국수자원공사에서는 본고에서 언급하고 있는 정수장에서의 부식억제제 적용을 위한 다양한 연구가 현재 세계 최고 수준의 연구팀을 구성하여 진행되고 있으며, 이와 관련된 주요 연구내용 및 연구추진체계는 그림 4)와 같다.

결론적으로 정수장에서의 부식억제제의 적용은 수도꼭지 수질의 향상과 안정성 확보 측면에서 반드시 이루어져야 할 것으로 생각되나, 우리의 현실에서 상기 언급한 부식억제제 적용을 위한 여러 가지 현안과 과제를 차분하면서도 철저히 검토한 후 적절한 시기에 국민들의 선택을 기다려야 할 것이다. ☺