

[報 文]

상수도 불소화에 관한 고찰; 양이온의 불화염 형성을 중심으로

안 해 원 · 신 동 천* · 정 용*

수원대학교 환경공학과, *연세대학교 환경공해연구소

A Review of Fluoridation of Municipal Drinking Water; Considering the Interaction of Cations and Fluoride

Hye-Won Ahn, Dong-Chun Shin* and Yong Chung*

Department of Environmental Engineering, The University of Suwon
**The Institute for Environmental Research, Yonsei University (IERY)*

ABSTRACT

In Korea, fluoride was first introduced into the drinking water of residents of Jinhae, Kyung Nam in 1981 for the prevention of dental caries. Ever since, growing numbers of communities favor fluoridation. The mechanism of F⁻ prevention of tooth decay is well known: fluoride ions substitute for hydroxyl ions in hydroxyapatite of hard tissues, which result in crystal perfection, with consequent reduction in dental caries. Soluble fluorides such as sodium fluoride are almost completely absorbed from the gastrointestinal tract. However, the presence of divalent or trivalent cations such as aluminum, magnesium, and calcium that can complex with F⁻ can reduce the degree of absorption. In U.S.A., over 7000 communities are now adding F⁻ to their drinking water. However, some portion of population oppose fluoridation, voicing both concern about the safety of fluoridation as well as for personal choice. Thus, This paper reviews the interaction of fluoride and cations as well as fluoride and suggests possible problems associated with fluoridation, a controversial issue.

서 론

우리 나라에서는 현재경남 진해시, 충북 청주시, 경기 과천시 및 경북 포항시에서 상수도 불소화 사업이 시범적으로 시행되고 있으며, 이러한 시범 사업은 강원 영월시, 경기 남양주시로 확대되고, 긍정적인 평가를 얻을 경우, 상수도 불소화 사업은 전

국으로 확대될 전망이다. 상수도 불소화는 치아우식증(충치) 예방 목적으로 현재 미국, 캐나다, 브라질, 소련, 홍콩, 필리핀 등 67개국에서 시행되고 있으며, 미국에서의 상수도 불소 첨가는 1945년 미시간주의 Grand Rapids 등에서 처음 실시된 이후 계속 증가하여 현재 0.7 ppm ~ 1.2 ppm의 불소가 첨가된 수도수는 미국 전체 인구의 약 60%에 공급되고 있다.^{1,2)} 오랜 기간에 걸친 광범위한 상수도의

불소화 추진에도 불구하고, 상수도수의 불소 첨가는 그 시작부터 많은 반대에 부딪혀 왔다.¹⁰ 상수도수 중의 불소 첨가를 반대하는 이유는 크게 두 가지로 나뉘 볼 수 있는데, 첫번째는 인간의 자유권 침해라는 입장에 근거하는 것으로서, 개인의 자유 의지와는 상관없이 모든 시민이 불소가 첨가된 상수도수를 일률적으로 마셔야 한다는 것에 반대하는 입장이며, 두번째는 과학적인 자료에 근거를 둔 반대 입장으로서, 상수도 불소화의 치아우식증(충치) 예방 효과에 의문을 제기하거나 상수도 불소화에 따른 건강 안전성 보장에 대해 우려하는 입장이다. 불소의 적절한 사용에 의한 치아우식증(충치) 예방은 국민 보건 향상에 지대한 기여를 하였음이 분명하며, 이러한 한가지 방법으로서 상수도수의 불소 첨가는 적은 비용으로도 현저한 치아우식증(충치) 예방 효과가 있다고 널리 믿어지고 있다. 하지만 이러한 믿음과는 달리, 일부 연구에서는 상수도수의 불소 첨가로 인한 치아우식증(충치) 예방 효과를 관찰할 수 없었으므로, 상수도 불소화에 따른 건강 안전성 문제를 거론하지 않더라도, 상수도 불소화의 필요성 자체가 논란의 대상이 되고 있다. 상수도 불소화로 미국의 학년기 아동의 치아우식증 발생빈도는 40~65%로 감소되었다고 보고된 바 있으며, 현재 불소는 치과영역에서 광범위하게 사용되고 있다. 이와는 반대로 일본에서는 1952~1971년까지 2개시에서 실험적으로 상수도 불소화를 실시하였으나, 효과 면에서 부정적으로 판단하여 사업 시행을 중단하였으며, 우리나라의 경우 청주시의 우식경험 영구치지수는 대조도시인 전주시의 경우와 비교해 볼 때 현저하게 감소하지 않았다고 보고되었는가 하면, 대조도시인 수원과 비교하였을 때 감소하였다고 보고되기도 하였다. 따라서, 우리 나라에서 상수도 불소화가 많은 논란의 대상이 되고 있는 이 시점에서 불소의 특성과 불소와 다른 양이온과의 상호작용에 대하여 살펴보고자 한다.

불소의 치아우식증 예방 효과

불소는 지각을 구성하고 있는 성분 중에서 13번째로 흔한 원소로 자연계에 널리 분포되어 있으며, 생체 시료에서도 쉽게 검출되는데¹¹ 이러한 불소의 공급원으로 가장 중요한 것은 여러 종류의 암석으로, 여기서 녹아 나온 불소는 토양이나 지하수를 오

염시킨다. 해수 중의 불소 농도는 0.8~1.4 ppm인 반면, 담수 중의 불소 농도는 0.1 ppm 이하의 낮은 농도에서부터 100 ppm 이상의 고농도까지 다양하다. 불소는 또한 화산 폭발이나 석탄 연소 및 알루미늄 제련소와 같은 공장의 배기가스에서 생성되므로, 불소화합물은 질소 화합물, 황 화합물에 이어 세번째로 양이 많은 대기오염물질로 알려져 있다.⁵⁾ 따라서, 대기, 토양 및 수중의 불소는 식물체로 흡수되며, 특히 차(tea) 종류의 불소 함량이 높은데, 홍차 1g에는 827 µg이라는 많은 양의 불소가 함유되어 있으며, 최근 국내 연구에 의하면 녹차 1g을 물 100 ml에 넣고 5분간 끓이면 553 µg의 불소가 녹아 나온다고 보고하였다.

이렇게 자연적으로 존재하는 불소 외에도, 치과 영역에서는 불소치약, 불소 양치액, 불소의 국소도포 등으로 불소를 광범위하게 사용하고 있다. 치과 영역에서 사용되는 불소 화합물을 살펴보면, 불소치약에는 불화나트륨(NaF), 제일 불화 인산소다(Sodium monofluorophosphate), 불화석(SnF₂), 아민 불소 등이, 불소 젤은 불화나트륨(NaF)과 산성 불화인산염(Acidulated phosphate of fluoride) 등이 사용되며, 상수도 불소화에는 불화나트륨(NaF), 불화규소나트륨(Na₂SiF₆), 불화규산(H₂SiF₆) 등이 널리 사용되고 있으며, 남미에서는 불화칼슘(calcium fluoride)도 널리 쓰이고 있다. 불화규소나트륨, 불화규산 및 대부분의 불화나트륨은 인산염 비료의 주성분인 인산 제조시 부산물로 생성되므로, 불소화합물의 생산량은 비료 판매량과 밀접한 관계가 있다.¹² 불화나트륨은 분말이나 결정체, 불화규소나트륨은 결정체인 반면에 불화규산은 20~35% 수용액으로 판매된다. 현재 국내의 상수도 불소화에 가장 많이 쓰이는 불화나트륨은 가격이 비싸고 국내 생산이 안되므로 전량 수입하여야 하며, 분말 투입기와 용해조가 필요해 시설비가 많이 드는 단점이 있으나, 함량 97~98% 이상의 순도 높은 제품을 얻을 수 있으며, 물에 용해되었을 때 중성의 pH(약 7.6)를 유지할 수 있다. 반면에 불화규산은 값이 저렴하며, 국내에서 생산할 수 있고, 액체이므로 용해과정이 필요 없으며, 분말형에 비해 정밀도가 높아서 현재 청주시의 상수도에 첨가되고 있으나, 20~35% 불화규산 수용액은 피부에 상처(delayed burn)를 줄 수 있으므로 취급시 조심하여야 하며, 강산성(pH 1.2)이므로 처리수의 pH

를 저하시키지 않는지 주의가 필요하다.

미국의 8세 아동들의 경우, 지난 29년 동안에 치아우식증의 90%가 감소하였으며, 앞으로도 치아우식증은 감소하는 추세인데, 이것의 원인으로 불소의 적절한 사용을 들 수 있다. 따라서, 전 세계를 통해서 불소는 치아우식증을 가장 효과적으로 예방할 수 있는 기적의 원소로까지 인정받고 있으며 그 작용기전 또한 잘 알려져 있다. 뼈와 치아의 견고한 구조는 칼슘, 인산기 및 수산기로 이루어진 결정체로서 인회석 (hydroxyapatite, $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$)과 유사한 구조를 갖는데, 여기에 탄산기, 구연산기, 불소, 마그네슘, 알루미늄, 철, 구리 등도 흔히 검출된다. 탄산이나 마그네슘이 포함된 결정체는 산에 의해 쉽게 분해되는 반면에, 불소이온이 공존하면, 결정체의 수산기는 불소이온으로 치환되어 불화 인회석 (fluoroapatite, $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$)이 형성된다. 이 때, 수산기가 모두 불소이온으로 치환되기 위해서는 38,000 ppm이라는 고농도의 불소이온이 존재하여야 하므로, 실제로 관찰되는 것은 인회석과 불화 인회석의 혼합형 ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2 \cdot \text{F}_x$)이다.¹⁰ 이것은 인회석보다 더 안정한 구조로 화학적 반응성이 감소되기 때문에 플라그 박테리아에 의해 분비되는 산에 대한 용해도가 감소하게 되고 따라서 우식치가 될 가능성이 적어진다. 이 밖에도, 불소는 치아우식을 유발시키는 치아 플라개의 세균인 *Streptococcus mutans*에 의해 설탕을 비롯한 발효성 탄수화물이 산으로 전환되는 과정을 저해하므로 탈석화가 방지되며, 부분적으로 용해된 결정체의 재발육도 돕는다고 알려져 있다. 또한 불소는, 시험관 내 (*in vitro system*)에서, 인산과 칼슘으로부터 인회석이 생성되는 것을 촉진시킨다는 보고도 있다.¹¹ 이러한 이유로 불소는 치아우식증 예방 목적으로 치과영역에서 광범위하게 사용되고 있는데, 치아가 형성되는 동안 불소에 노출되면 치아의 불소 농도가 증가하여 상기한 치아우식증 예방 효과가 크게 나타나지만, 형성이 완료된 치아는 불소 농도가 크게 증가하지 않으므로 불소에 의한 치아우식증 예방은 어린아이에게서 효과가 크다. 한편 뼈는 치아와 달리 성장이 완료된 후에도 계속 만들어지고 (bone formation) 녹여지는 (bone resorption) 과정을 거쳐 변형 (remodelling) 되므로 고농도의 불소 (50 mg NaF/day)는 골다공증 치료 목적으로 현재 임상에서 시험적으로 사용 중에 있다.¹²⁾

불소와 양이온과의 상호작용

불소는 자연계에서 단독으로 존재하지 않으며, 양이온과 결합을 하여 불화물의 형태로 존재한다. 음식에는 알루미늄, 칼슘, 마그네슘, 티타늄, 철 (III), 실리콘 등이 함유되어 있는 경우가 많으며, 이들 양이온은 불소와 반응하여 불화물을 형성한다고 알려져 있다. 불소는 흡입이나 섭취될 경우, 각각 폐나 위장관을 통해 흡수되는데, 알루미늄 제련소와 같은 일부 공장 지역을 제외한 일반적인 지역의 사람들은 불소의 대부분을 음료수나 음식을 통해서 섭취하게 된다.¹³⁾ 섭취된 불소의 대부분은 위장관을 통해서 흡수되는데, 쥐의 경우, 섭취된 불소의 20~25%는 위에서, 75~80%는 소장에서 흡수된다.¹⁴⁾ 이 때, 알루미늄, 칼슘, 마그네슘과 같은 양이온이 고농도로 존재하지 않으면, 불화나트륨처럼 쉽게 용해되는 불소화합물 중의 불소는 불산 (hydrofluoric acid, HF)의 형태로 단순화산에 의해 빠른 시간 내에 위장관으로부터 거의 전량 (97%)이 흡수되며, 흡수되지 않은 불소는 변으로 배설되는 반면 흡수된 불소의 약 50%는 24시간내에 뇨로 배설되고, 몸에 남아 있는 불소의 99%는 뼈와 치아에 축적된다. 따라서 뼈에는 불소 함량이 높고 멸치와 같은 뼈째 먹는 식품으로부터 비교적 많은 양의 불소를 섭취하게 된다. 알루미늄, 칼슘 및 마그네슘 등과 같은 2가 및 3가 양이온은 불소와 결합하여 불용성 화합물을 형성하므로 불소의 위장관으로부터의 흡수가 현저하게 저하된다고 널리 알려져 있다. 즉, 다양한 농도의 불소와 알루미늄을 동시에 물에 첨가하여 10주간 토끼에 먹인 후, 조직에 축적되는 불소와 알루미늄의 농도를 측정해 본 결과, 조직에 축적된 불소의 농도는 먹는 물에 첨가된 알루미늄의 농도가 증가함에 따라 감소하였다. 이러한 현상은 다른 실험동물에서도 관찰되며, 양과 소에서 반상치와 같은 불소 독성이 나타날 때, 이를 개선시키기 위해 칼슘과 알루미늄이 경구 투여되어 오고 있다.^{13,14)} 가축 뿐만 아니라 사람의 경우에도 유사한 현상이 관찰되는데, 제산제로 널리 쓰이고 있는 수산화 알루미늄을 복용한 사람 (1.8 g Al/day)은 고농도와 저농도 불소 (4 mg/day, 50 mg/day)의 위장관으로부터 흡수가 57%나 저하된다고 보고¹⁵⁾ 되었으며, 다량의 불소에 중독된 사람에게서는 불소의 급성 독성을 줄이기 위한 투석요법 외에

도, 최도제(구토를 유발하는 약)를 부여한 후 칼슘 화합물(^{14}C calcium gluconate 혹은 염화칼슘)을 경구 투여하는데, 칼슘화합물이 없을 경우 우유를 먹이기도 한다.¹⁶⁾

한편 음식 중의 아연과 철은 뼈에 축적되는 불소의 양을 변화시키지 않으나, 카제인(casein) 및 락토알부민(lactoalbumin)과 같은 단백질이 음식에 포함되어 있으면, 뼈에 축적되는 불소의 양을 현저하게 감소시키며, 음식 중의 고지방은 불소의 흡수를 증가시킬 수 있다고 보고된 바 있다. 이렇게 불소의 흡수는 공존하는 성분에 의해 많은 영향을 받으며, 음식은 많은 영양물질을 함유하고 있으므로, 수중의 불소가 음식 중의 불소에 비하여 흡수가 잘 된다고 알려져 있다.

알루미늄, 티타늄, 철(III), 실리콘 등의 양이온은 수중에서도 검출되는데, 이는 암석의 침식작용과 같은 자연적인 과정이나, 혹은 수처리 과정에서 인위적으로 첨가되는 응집제(alum, ferric chloride, sodium silicate)로 부터 유래된 것이다. 수중에서 이들 양이온이 불화물을 형성하는 상대적인 양은 불소의 농도, 양이온의 농도 및 물의 pH에 의해 결정된다. 중성 pH의 음용수에서는 경수인 경우 특히 다량 존재하는 마그네슘과 칼슘만이 불소와 결합하여 불화 마그네슘과 불화 칼슘을 형성한다고 보고¹⁷⁾ 되었으나, pH 4.5에서는 알루미늄이 불소와 결합하여 불화 알루미늄 복합체를 형성하는 비율이 가장

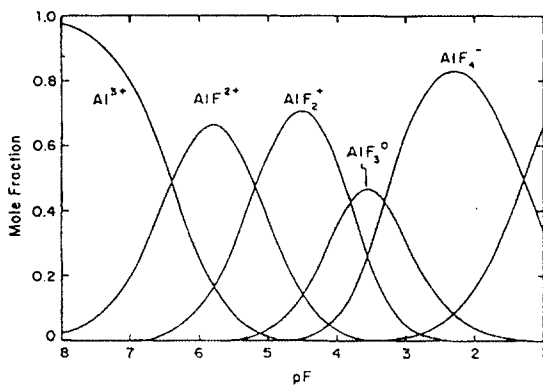


Fig. 1. Mole fraction of aluminum-fluoride complexes as a function of pF ($-\log[F]$) at acidic pH values. At pH 7.5, $Al(OH)_3$ is a predominant form at pF greater than 4. Reproduced from Martin (1986).

Table 1. Complexing of fluoride in solutions containing 1 ppm F and cations that may be present in drinking water. Reproduced from Brudevold *et al.* (1972).

Cation	ppm	% F complexed
Ca	40	0.5
Ca	100	2.8
Mg	30	2.4
Mg	100	6.6
Fe ⁺⁺⁺	0.2	2.0
Al	0.05	6.5
Al	0.10	13.0
Al	0.20	24.5
Al	0.30	35.5
Ti ⁺⁺⁺	1.0	8.4

높은 것으로 알려져 있다.¹⁸⁾ 섭취된 불소의 대부분은 위장관을 통해서 흡수되는데, 위의 pH는 1.2 정도이고, 십이지장의 pH는 4.7~6.5라는 것을 고려해 볼 때, pH 4.5에서 수중에 존재하는 양이온의 불화물은 인체 노출면에서 더 큰 중요성을 갖는다. Martin¹⁹⁾은 불소이온 농도와 pH에 따라 불화 알루미늄($F-Al$ 복합체)은 AlF^+ , AlF_2^+ , AlF_3^0 및 AlF_4^- 와 같은 여러 가지 형태로 존재한다고 보고하였다(그림 1). 상수도수에서 칼슘, 마그네슘, 철, 알루미늄과 티타늄은 불소와 결합하여 불화물을 형성하는데, 1 ppm의 불소와 양이온이 공존할 때, 불화물을 형성하는 비율은 표 1과 같다.¹⁸⁾ 즉, 수중의 양이온들 중에서 알루미늄은 불화물을 가장 잘 형성하며, 수중의 알루미늄 농도가 증가함에 따라 $Al-F$ 복합체가 형성되는 비율도 비례하여 증가함을 알 수 있다. 일반적으로 수중의 알루미늄 농도는 높지 않으나, 알루미늄 화합물인 명반($Alum$, $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$)이나 PAC (Poly aluminum chloride)가 응집제로 사용된 경우는 수도수 중의 알루미늄 농도가 알루미늄으로 처리되지 않은 수도수에 비하여 현저하게 높으며, 용기로부터의 알루미늄 용출도 보고되고 있다. 불소 농도를 1 ppm으로 조정된 중성의 상수도수를 알루미늄 용기에 넣고 30분간 가열하면 수중의 알루미늄 농도가 0.03 ppm에서 0.24 ppm으로 증가하며, 불화물의 형성 비율도 전체 불소의 50%까지 증가하는데, 이러한 용기로부터의 알루미늄 용출은 상수도수의 pH가 3.5인 경우 더욱 증가하여 전체 불소의 76%가 불화물로 존재한다.¹⁸⁾ 또한 Tennakone 등²⁰⁾은 불소가 함유되어 있

지 않은 물을 주방용 알루미늄 용기로 10분간 가열했을 때, 물의 알루미늄 농도가 0.2 ppm이었던 것에 반하여, 1 ppm의 불소가 함유된 물을 똑같이 처리하였을 경우, 알루미늄 농도가 200 ppm으로 현저하게 증가하였으며, 가열 시간을 연장하면 알루미늄 농도가 600 ppm으로 증가한다고 보고한 바 있다. 따라서 불소는 알루미늄의 용출을 증가시키는데, 특히 우리의 식습관을 고려해 볼 때, 김치찌개와 같은 산성 식품을 알루미늄 냄비에 넣고 조리할 경우 알루미늄의 용출이 증가되며, 이때 수도수 중에 존재하는 불소의 대부분은 $Al-F$ 복합체로서 존재하게 되리라고 추정할 수 있다. 알루미늄은 과거에는 인체에 무해하다고 알려져 왔으나, 현재에는 빈혈을 일으키며, 신경 및 뼈에 독성이 있음이 널리 알려져²¹⁾ 있으므로, 수도수중의 알루미늄의 최대 허용치는 0.2 ppm으로 규정이 되어 있음을 고려해 볼 때, 상수도수의 불소화에 따라 야기될 수 있는 알루미늄 용기로부터의 Al 용출 및 이에 따른 안전성에 대한 연구가 필수적이다.

한편, 앞에서 언급된 바와 같이 고농도의 불소는 골다공증 치료 목적으로 임상에서 시험적으로 사용되고 있는데, 현재 투여되고 있는 치료제인 칼슘, 에스트로젠, 칼시토닌은 뼈를 생성하는 과정 (bone formation)에는 영향을 주지 않고 뼈를 녹이는 과정 (bone resorption)만을 저해하지만, 불소는 뼈를 생성하는 과정을 증가시키므로 이상적인 골다공증 치료제로 판단되어 임상에서 응용되었으나, 실제 불소를 골다공증 환자에게 투여하였을 때 환자마다 반응하는 정도가 매우 달랐으며, 전체 골절률은 감소하지 않았다. 동물실험에서 불화 나트륨 (50~79 ppm F as NaF)이 첨가된 물을 먹인 토끼의 경골 및 쥐의 흉골에서 측정된 알루미늄 농도는 먹는 물에 알루미늄을 첨가하지 않았음에도 불구하고 대조군에 비하여 최고 11배나 증가되었으며,²²⁾ 알루미늄이 뼈에 독성이 있다는 것을 고려해 볼 때, 이러한 현상이 사람에게서도 관찰된다면, 골다공증 환자에서 나타난 불소의 부작용은 뼈에 축적된 알루미늄 혹은 F-Al 복합체에 의한 것이라고 추정할 수 있다. 이렇게 우리가 흔히 간과하는 불소와 다른 양이온들과의 상호작용은 실제 조직에 축적되는 불소의 양을 크게 변화시키므로 반드시 고려하여야 할 중요한 문제이다.

불소의 독성

상수도 불소화를 반대하는 가장 큰 이유는 불소 첨가에 의한 인체 건강에 미치는 악영향에 대한 우려이므로, 이제까지 알려진 불소의 독성에 대하여 살펴보고자 한다. 불소의 급성 독성 중 가장 흔하게 나타나는 증상으로는 오심 (nausea), 구토, 설사, 복부 통증을 들 수 있는데, 이러한 증상은 위에서 불산 (hydrofluoric acid, HF)이 생성되므로 나타나는 증상이며, 심한 경우 위장관을 심하게 손상시키게 되고, 식욕부진, 현기증, 두통, 가려움증, 지각이상 등이 나타나며 치사량에서는 혈액 중의 칼슘의 농도는 낮아지고, 칼륨의 농도는 높아져 결국 심부전으로 사망하게 된다.

미국에서 상수도 불소화를 시작한 1945년 이래 현재까지 상수도수에 과량의 불소가 첨가된 사고는 관리 요원의 부주의나 설비의 고장으로 인해서 여섯 번 발생하였는데, 과량의 불소에 노출된 대다수의 주민들은 오심과 구토를 호소하였다.²³⁾ 불소는 또한 많은 효소들의 작용을 저해하므로, 실험실에서 효소의 작용을 억제 (nonspecific inhibitor)하기 위해 사용되어 왔으며, phosphatases, phosphorylases와 ATPases와 같은 효소들과, 구리, 망간, 아연, 니켈 및 철과 같은 금속을 필요로 하는 효소들 (metalloenzymes)을 저해하는데, 이는 불소가 이들 금속이온과 결합을 하기 때문이다. 그러나 불소의 급성 독성은 이러한 효소의 작용 억제에 의해서는 잘 설명이 되지 않으며, 일차적으로 위의 불산 생성에 의해 영향을 받는다.

한편, 가장 초기에 명백하게 관찰되는 불소의 만성 독성으로는 반상치 (dental fluorosis)를 들 수 있는데 치아가 맹출 하기 전에 법랑질 형성이 방해 를 받아 하얀 색이나 갈색의 점이 생기는 증상으로, 심미적으로 좋지 않을 뿐만 아니라 심한 경우 치아가 부서지기 쉽다. 반상치 발생을 불소의 독성으로 간주하면, 불소는 다른 원소와는 달리 치료지수 (therapeutic index)가 매우 낮아서, 치아우식증이 예방되는 불소의 농도와 반상치를 유발하는 불소의 농도가 큰 차이가 나지 않는다. 실제 치아우식증 예방 목적으로 상수도수에 1 ppm의 불소를 가하였을 때에도 급수 인구중 1~2%는 치아의 탈색이나 법랑질에 반점이 생기는 등 불소의 독성을 나타내며, 불소 농도 4 ppm에서는 최대 33%의 급수 인구에서

반상치를 관찰할 수 있다고 보고된 바 있다.²¹⁾ 미국에서 음용수 중 불소의 최대 오염 허용치는 4 ppm으로 규정하고 있는데, 그 이유는 자연적으로 불소의 함량이 높은 지역에서는 과량의 불소를 알루미늄 화합물(activated alumina, alum)을 사용하여 제거하는데, 이에 소요되는 비용이 너무 많기 때문이다. 더 심각한 불소의 만성 독성인 불구성 골격 불소증(crippling skeletal fluorosis)은 불소를 10~20년 동안 매일 20~80 mg 섭취하게 되면 나타나는데, 척추가 부분적으로 융합되어 몸의 움직임이 자유롭게 못한 불구가 되는 병이다.

이러한 골격 불소증이 나타나는 것은 수중의 불소 농도 외에도 개인의 영양상태, Vit D나 단백질 및 칼슘의 섭취량, 수중의 칼슘과 마그네슘 농도에 의해서도 영향을 받으므로, 인도에서는 수중의 불소 농도가 2 ppm 이상인 지역의 일부 주민들에서도 불구성 불소 골격증이 관찰되었다고 보고된 바 있다.²²⁾ 미국에서는 십여 건의 골격 불소증이 관찰되었는데, 이들은 수중의 불소 농도가 4 ppm으로 높은 지역에 거주하거나, 수중 불소 농도가 4 ppm보다 낮은 지역에 거주하더라도 신장 기능이 저하된 사람으로, 불소가 신장에 독성을 나타낸다는 증거는 없으나, 섭취된 불소의 50%가 신장을 통해 뇨로 배설되므로 신장기능저하로 인한 불소의 배설이 저하되어 불소 골격증과 같은 불소의 독성이 나타난 것으로 설명된다.

한편, 불소의 돌연변이원성 및 발암성은 많은 사람들로부터 오랫동안 관심의 초점이 되어 왔다. 먼저, 이제까지 행해진 불소의 돌연변이원성 및 발암성에 관한 연구들을 살펴보면, *Salmonella typhimurium*를 사용한 Ames assay 결과 불화나트륨은 돌연변이원성이 없으며,^{23, 26, 27)} 효모(*Saccharomyces cerevisiae*)에서도 돌연변이를 일으키지 않는다고 알려져 있다.²⁸⁾ 생체외 시험(*In vitro* system)인 포유동물의 세포 배양 실험결과 쥐(mice)에서 얻은 임파선 암세포에서 불화나트륨은 돌연변이를 일으켰으나, 불화나트륨의 생체내(*in vivo*) 돌연변이원성의 연구결과는 논문에 따라 다르게 보고²⁹⁾되는 경우가 많으므로, 아직 확정되지 않은 상태이다. 불소가 돌연변이원성이 있다는 일부 실험결과와 불소는 위에서 자극성이 큰 불산을 형성한다는 사실에 비추어 보아 불소가 위암을 유발할지도 모르는 우려가 커지자, 미국의 National Toxicology

Program (NTP)은 불화나트륨을 첨가한 물을 쥐(Fisher 344 rats, B6C3F₁ mice)에 2년간 먹인 후 암의 발생 여부를 조사하였으며, 연구 결과 수컷 쥐(Fischer 344 rats)의 경우에서만, 45 ppm 불소를 섭취하였을 때 2%, 79 ppm 불소를 섭취하였을 때 4%의 빈도로 골육종(osteosarcoma)이 발생하였다고 보고하였으며, 발생 빈도가 매우 낮으므로, 불소의 발암성은 모호(equivocal evidence of carcinogenicity)하다고 결론 내렸다.²⁶⁾ 이러한 연구 결과가 발표되자 상수도 불소화를 반대하는 일부 학자들은 비록 발생 빈도가 낮은 하지만, 음료수의 불소 농도가 증가함에 따라 골육종의 발생 빈도가 증가하며, 골육종이 흔하게 나타나는 암이 아니라는 이유로 상수도 불소화의 발암성에 대한 강한 우려를 표시했으며, 과연 불소가 사람에게서도 골육종을 일으키는지를 조사한 많은 연구가 뒤를 이어 행해졌다. 일부 연구에서는 불소에 의한 골육종의 증가가 보고되기도 하였으나, 대다수의 연구 결과³⁰⁾는 사람의 경우, 골육종환자의 불소 섭취와 대조군의 불소 섭취를 비교한 결과, 불소가 골육종의 원인 물질이라는 증거를 찾을 수 없었으나, 불소의 발암성에 대해서는 현재로서는 결론을 내릴 수 없으며, 연구방법의 향상과 지속적인 관심이 필요한 분야이다.

이 밖의 불소의 독성으로는 극히 일부의 예민한 사람들에게서 아토피성 피부염, 담마진과 같은 피부 질환, 두통, 현기증 및 근무력증 등이 보고되고 있으나 고농도의 불소에 노출된 경우를 제외한 불소가 첨가된 상수에 의해 이러한 독성이 나타나는 경우는 많지 않다.

결 론

전 세계적으로 치아우식증 발생 빈도는 감소하는 추세이나, 우리 나라는 이와 반대로 치아우식증 발생 빈도가 증가하고 있으며, 이에 대한 대책으로 불소치약, 불소 양치액, 불소의 국소도포 및 상수도 불소화와 같은 불소의 적절한 사용을 고려해 볼 수 있다. 전 세계를 통해서 불소의 치아우식증 예방 효과는 널리 알려져 있으며, 수중의 불소는 식품 중의 불소에 비하여 섭취가 훨씬 용이한 것으로 알려져 있으므로, 현재 우리나라의 일부 시에서 상수도 불소화 사업이 시행 중에 있다.

그러나, 1945년부터 상수도 불소화를 시행해 오

고 있는 미국에서도 상수도 불소화의 반대 의견이 끊임없이 제기되고 있으며, 우리 나라에서도 상수도 불소화 사업에 대한 관심이 고조되어 있는 이 시점에서 상수도 불소화에 대한 몇 가지 문제점에 대하여 언급하고자 한다.

상수도 불소화에 의한 치아우식증 예방 효과는 상반된 연구 결과가 보고되고 있으므로 논란의 여지가 있다. 이러한 상반된 연구 결과의 원인으로는 여러 가지가 있겠으나, 부적절한 불소량이 상수도수에 가해졌을 가능성을 배제할 수 없다. 상수도 불소화 사업에서 상수도수에 첨가할 적정량의 불소 농도는 연평균 매일 최고 기온 혹은 연령별, 반점도별(斑點度別) 경미 반점치 유병율(輕微 斑點齒 有病率)에 의해 결정되고 있다. 불소의 특성을 고려해 볼 때, 낮은 농도에서는 치아우식증 예방 효과가 없으며, 치아우식증이 예방되는 불소의 농도와 반상치를 유발하는 불소의 농도 사이에는 큰 차이가 나지 않으므로, 경미 반점치 유병율을 상수도수에 첨가할 적정량의 불소 농도 산정에 이용하게 된다. 따라서, 불소의 독성을 최소화하면서, 치아우식증 예방효과를 얻기 위해서는 체내 불소량을 일정한 수준으로 유지하여야 할 필요가 있으나, 상수도수에 불소를 첨가할 경우, 불소와 공존하는 양이온들은 불소의 생체 이용률(bioavailability)을 크게 저하시키며, 개인의 식습관이나 건강 상태가 다르므로 어려움이 따른다. 뼈째 먹는 생선이나 차(tea)종류는 불소가 많이 들어 있는 식품이며, 현재 한국인의 표준 식사를 통한 불소(F)의 섭취량, 해당 지역의 섭취 식품 중의 불소 함량 및 기타 불소의 공급원을 고려한 일상적인 한국인의 불소 섭취량에 대한 충분한 조사가 되어 있지 않으므로 이러한 기초 조사가 선행되어야 하며, 이러한 결과를 적절한 불소 첨가량 산출에 참고하여야 한다. 또한, 신장기능이 저하되어 있는 환자는 불소의 소변으로의 배설이 저해되므로 체내 불소량이 증가하게 되고 정상인의 경우보다 훨씬 낮은 불소 농도에서 독성을 나타내게 되는 반면에, 수중에 불소와 공존하는 알루미늄, 마그네슘, 칼슘 등의 양이온들은 위장관으로부터의 불소의 흡수를 저하시키므로 체내 불소량은 감소하여 치아우식증 예방 효과를 기대할 수 없게 된다. 이 밖에도, 불소는 알루미늄 용기로부터 알루미늄의 용출을 증가시키며, 고농도의 불소는 체내 알루미늄의 축적량을 증가시킬 가능성이 있으므로 이에 대한 연구가

필수적이나, 현재로서는 불소와 양이온들과의 상호 작용에 관한 연구가 극히 드문 실정이다. 상수도 불소화에 따른 인체 건강에 미치는 영향 중 발암성은 오랫동안 논란이 되어 오고 있으며, 현재까지는 결론을 내릴 수 없으나, 상수도 불소화에 따른 골육종의 발병 가능성이 제기되고 있다. 상수도 불소화를 할 경우, 음용수로 이용되지 않는 수돗물에 함유되어 있는 불소에 대한 고려는 접어 두더라도, 앞서 언급된 문제점 중 일부는 개인의 상황을 고려할 수 없이 모든 사람이 일률적으로 불소가 첨가된 상수를 마셔야 하는데 그 원인이 있다.

상수도 불소화외에도 불소의 국소 도포, 불소치약이나 불소 양치액의 사용, 불소가 첨가된 먹는 샘물이나 불소 정제(tablet, pill)의 판매 등으로 우리는 여전히 불소의 치아우식증 예방 목적을 달성할 수 있다. 이러한 불소의 이용은 개인의 상황을 고려할 수 있으므로, 앞서 언급한 여러 가지 상수도 불소화의 문제점을 해결할 수 있다. 불소의 국소도포는 비용이 비싸고 치과 병원에 가야 한다는 번거로움이 있어 대중적이지 못하다는 불소의 국소 도포의 단점은 앞서 언급한 여러 가지 상수도 불소화의 문제점에 비하여 쉽게 극복될 수 있는 것으로 사료된다. 따라서, 우리 나라의 상수도 불소화가 전국으로 확산되려는 현 시점에서 상수도 불소화에 대한 여러 가지 우려를 충분히 검토한 후 의견을 수렴하여 국민의 치아건강을 위하여 가장 효과적이고 안전한 방법이 무엇인가를 잘 선택하여야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. Blair, K.P. Fluoridation in the 1990'S. J. Amer. Coll. Dentists. p.3(1992).
2. Corbin, S.B. Policy options for fluoride use. J. Amer. Coll. Dentists. 59(3), 18-23(1992).
3. Hilleman, B. Fluoridation of water. Chemical and Engineering News. Aug. 1, 26-42(1988).
4. Krishnamachari, K.A.V.R. Fluorine. In Trace elements in Human and Animal Nutrition, Vol. 1. Metry, W.(Ed.), Academic Press, Inc., Snadiego, CA, pp.365-415(1987).
5. Bell, M.C. and Ludwig, T.G. Ingestion from water. Fluoride and human health, pp.18-32 (WHO, Geneve) (1970).
6. Lopez, H. and Navia, J.M. A method to

- assay fluoride in foods, beverages, and diets. *Caries Res.* **22**, 210-216 (1988).
7. Reeves, T.G. Water Fluoridation In A Training Course Manual for Engineers and Technicians, United States Department of Health and Human Services, Public Health Service, Centers for Disease Control, Centers for Disease Control, Atlanta, Ga. (1986).
 8. Grynblas, M.D. Fluoride effects on bone crystals. *J. Bone Miner. Res.* (Suppl. 1) **5**, S169-S175 (1990).
 9. Newesely, H. Changes in crystal types of low solubility calcium phosphates in the presence of accompanying ions. *Arch. Oral Biol.* **6**, 174-180 (1961).
 10. Pak, C.Y.C., Sakhaee, K., Zerwekh, J.E., Parcil, C., Peterson, R., and Johnson, K. Safe and effective treatment of osteoporosis with intermittent slow release fluoride: augmentation of vertebral bone mass and inhibition of fractures. *J. Clin. Endocrinol. Metab.* **68**, 150-159 (1989).
 11. Hodge, H.C., and Smith, F.A. Occupational fluoride exposure. *J. Occup. Med.* **19**, 12-39 (1977).
 12. Nopakun, J., Messer, H.H., and Voller, V. Fluoride absorption from the gastrointestinal tract of rats. *J. Nutr.* **119**, 1411-1417 (1989).
 13. Kessabi, M., Hamliri, A., and Braun, J.P. Experimental fluorosis in sheep: Alleviating effects of aluminum. *Bel. Hum. Toxicol.* **28**, 300-304 (1986).
 14. Grunder, H.D. Prevention of fluoride effects in cattle. *Fluorides* **5**, 74-81 (1972).
 15. Spencer, H., Kramer, L., Norris, C., and Wiatrowske, E. Effect of aluminum hydroxide on fluoride metabolism. *Clin. Pharmacol. Ther.* **28**, 529-535 (1980).
 16. Whitford, G.M. The metabolism and toxicity of fluoride. In *Monographs in Oral Science*, Vol. 13, Ed., H.M. Myers, Karger, Basel, Switzerland (1989).
 17. Feldman, I., Marken, D., and Hodge, H.C. 1957 The state of fluoride in drinking water. *J. dent. Res.* **36**, 192-202.
 18. Brudevold F., Moreno, E., and Bakhos, Y. Fluoride complexes in drinking water. *Arch. Oral Biol.* **17**, 1155-1163 (1972).
 19. Martin, R.B. The chemistry of aluminum as related to biology and medicine. *Clin. Chem.* **32**, 1797-1806 (1986).
 20. Tennakone, K., and Wickramanayake, S. Aluminum leaching from cooking utensils. *Nature.* **325**, 202 (1987).
 21. Kerr, D.N.S., and Ward, M.K. Aluminum intoxication: History of its clinical recognition and management. In *Metal Ions in Biological System: Aluminum and its Role in Biology*. Sigel, H. (Ed.), Marcel Dekker, Inc., New York, N. Y., pp. 217-258 (1988).
 22. Ahn, H.W., Fulton, B., Moxon, D., and Jeffery, E.H. Interactive effects of fluoride and aluminum uptake and accumulation in bones of rabbits administered both agents in their drinking water. *J. Toxicol. Environ. Health.* **44**, 337-350 (1995).
 23. Gessener, B.D., Beller, M., Middaugh, J.P., and Whitford, G.M. Acute fluoride poisoning from a public water system. *New. England J. Medicine.* **330**(2), 95-99 (1994).
 24. Kaminsky, L.S., Mahoney, M.C., and Miller, M.J. Fluoride: Benefits and risks of exposure. The preparation of a report. *J. Amer. Coll. Dentists.* **59**(3), 4-7 (1992).
 25. Li, Y., Dumipace, A.J., and Stookey, G.K. Absence of mutagenic and antimutagenic activities of fluoride in Ames Salmonella assays. *Mutat. Res.* **190**, 229-236 (1987).
 26. NIH. NTP technical report on the toxicology and carcinogenesis studies of sodium fluoride (CAS No. 7681-49-4) in F344/N rats and B6C3F1 mice (drinking water studies), NIH Publication 90-2848, April 26, 1990 (1990).
 27. Tong, C.C., McQueen, C.A., Ved Brat, S., and Williams, G.M. The lack of genotoxicity of sodium fluoride in a battery of cellular tests. *Cell Biol. Toxicol.* **4**, 173-186 (1988).
 28. Litton Bionetics. Mutagenic evaluation of sodium fluoride. Report prepared for the U.S. Food and Drug Administration. Contract#223-74-2104 (1975).
 29. Zeigler, E., Shelby, M.D., and Witt, K.L. Genetic toxicity of fluoride. *Environ. Mol. Mutagen.* **21**, 309-318 (1993).
 30. Maurer, J.K., Cheng, M.C., Boysen, B.G., and Anderson, R.L. Two-year carcinogenicity study of sodium fluoride in rats. *J. Nat'l. Cancer Inst.* **82**, 1118-1126 (1990).