

# 정수장에서 불소 투입에 따른 상수관로내 불소농도 예측

이경훈<sup>1)</sup> · 임상주<sup>2)</sup> · 오창주<sup>3)</sup> · ○김태경<sup>4)</sup>

## 1. 서 론

국민의 소득수준 향상과 식생활 습관의 다양화는 안정된 정수의 공급 차원을 넘어 안전한 수질의 정수를 요구하고 있을 뿐만 아니라, 국민 보건증진 차원의 구강건강의 문제들까지 해결된 양호한 상수 수질을 요구하고 있는 실정이다. 또한, 최근에는 국민 구강 보건증진 측면에서 불소 투입여부와 관계된 수질이 큰 관심을 불러일으키고 있다. 그러므로, 본 연구에서는 보다 더 안전하고 국민 구강건강에 크게 도움이 되는 질 좋은 상수를 얻기 위하여 정수장 불소 투입에 따른 상수관로내 불소 농도의 변화를 예측하였다. 상수관로내의 불소 농도를 예측하기 위하여 대상지역에 대해 컴퓨터 시뮬레이션 모형인 EPANET 모형을 이용하여 상수관망내 불소 농도에 대해 수리 및 수질 변화를 분석하였으며, 정수장의 불소 투입농도와 각 수용가의 불소이온 농도변화를 예측·분석하였다. 또한, 대상지역의 상수 관로내에서 불소 농도의 시간적 및 공간적 분포특성을 파악하여 음용수 수질 기준에 적합한 불소농도를 유지할 수 있도록 정수장에서 불소 투입량을 조절하도록 예측하는 한편, 불소는 고농도 섭취시 반상치 및 골연화증을 유발할 우려가 있으므로 음용수 수질 기준농도인 1.5mg/l를 넘지 않는 범위내에서 불소를 섭취 할 수 있도록 불소 농도를 조절하여 국민구강 보건 증진에 기여하는 상수관로내 불소의 수리적 특성 자료로 활용하고자 한다.

## 2. 이론적 고찰

### 2.1 불소

불소는 원자량이 약 19.0으로서 화학주기율표에서 halogen으로 불리는 제 7족에 속한 원소이다. 불소는 수분이 존재하는 경우 용해되어 불소이온으로 되며 분자상태의 불소는 상온에서 매우 불안정하여 자연계에서는 발견되지 않으며 단지 불화물로서 존재할 뿐이다. 자연수에서의 불소농도는 극히 낮은 수준이나 불화물을 많이 함유한 암반층을 흐르는 지하수에서는 불소농도가 10ppm에 이르는 경우도 있다. 불소가 들어있는 수돗물을 마시게 되면 불소가 우리 몸에 흡수되어 치아의 법랑질(치아의 표면층) 구성성분인 수산화인석회내의 수산기와 불소가 치환반응을 일으켜 법랑질을 산에 강하게 만들어 치아우식증을 예방하게 되며, 또한, 수돗물에 함유된 불소가 아주 미세한 우식병소에 침착되어 치아우식증을 예방하게 된다. 또한, 이 불소의 치아에 대한 작용효과는 물을 끓여 마시는 경우에도 전혀 변화가 없는 것으로 알려져 있다.

### 2.2 상수도 불소화사업

상수도 불소화사업이란 정수장에서 상수도수에 저농도의 불소를 투입함으로써 치아우식증(충치)을 예방하기 위하여 저농도의 상수를 통해 불소를 섭취하게 하여 수돗물의 불소농도가 적정하도록 조절하는 공중구강 보건사업이라 할 수 있다. 즉, 정수장에 불소투입기를 설치하여 우리가 마시는 수돗물에 일정한 농도(0.8ppm)의 불소가 자동적으로 투입하여 치아우식증을 예방하도록 하는 사업이다.

- 1) 전남대학교 공과대학 토목공학과 교수
- 2) 전남과학대학 지리정보·토목과 전임강사
- 3) 전남과학대학 지리정보·토목과 전임강사
- 4) 전남대학교 공과대학 토목공학과 박사과정

### 3. 대상지역 현황

#### 3.1 대상지역의 현황

광주광역시 상수도 시설은 1920년 5월 제 1수원지를 건설해 1일 800m<sup>3</sup>의 수돗물을 생산·공급을 시작으로 상수도 사업의 활발한 추진과 1970년대 이후 지속적인 경제성장과 더불어 국민들의 생활수준 향상과 인구증가, 도시화 및 공업화 등으로 급수량의 수요가 급격히 증가함에 따라 시설을 확장하여 1999년 12월 현재 5개구에 총 인구는 약 137만명, 급수인구는 약 130만명, 시설용량은 83만톤/day, 급수량은 40만톤/day, 보급률은 95.1%, 1인당 급수량은 309 ℓ/day이다.

#### 3.2 수질검사 결과

불소이온과 민감하게 반응하여 상관성이 높은 상수 중에 함유된 수질항목에 대해 대상지역인 광주광역시의 수질검사 결과를 일년 중 월별로 분석하였다. 그림 3.2.1은 PH의 검사결과로서 기준치인 5.8~8.5 사이에 분포하고 있음을 나타내고 있고, 그림 3.2.2는 탁도에 대한 월별 수질검사 결과로서 기준치인 1 NTU에 미달하는 것으로 나타났으며, 그림 3.2.3은 월별 평균색도의 분포를 나타내고 있고, 그림 3.2.4는 광주광역시의 과망간산칼륨의 소비량을 나타내고 있는데, 수질검사는 2000년 1월부터 12월까지의 결과를 월별로 분석하여 나타낸 평균값이며, 광주광역시의 수질은 먹는 물 수질기준 농도에 모두 적합한 것으로 판단된다.

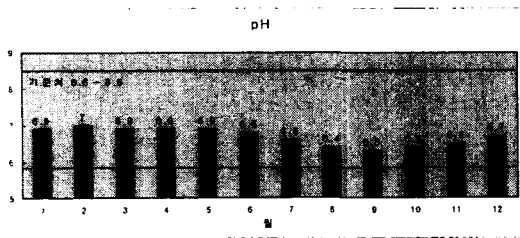


그림 3.2.1 광주광역시의 월별 PH 변화

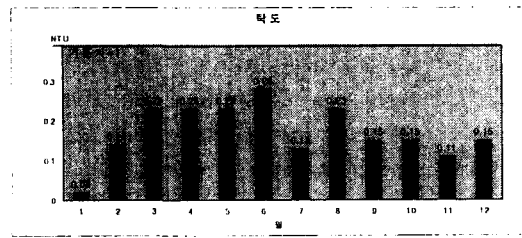


그림 3.2.2 광주광역시의 월별 탁도 농도 변화

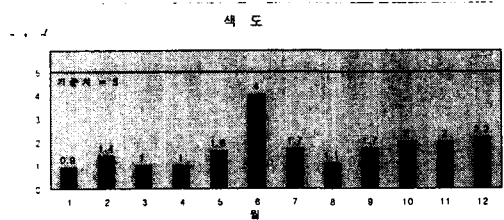


그림 3.2.3 광주광역시의 월별 색도의 농도

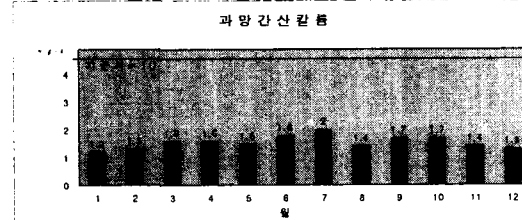


그림 3.2.4 광주광역시의 월별 과망간산칼륨 소비량

### 4. 분석방법

#### 4.1 분석방법

대상지역은 상수도 불소화사업을 시행하고 있는 지역이 아니므로 대한 잔류염소의 농도변화를 컴퓨터 시뮬레이션 모형인 EPANET 모형을 이용하여 상수관망에서의 수체의 수리 및 수질변화를 비교·분석하였다. EPANET 모형을 이용하여 예측한 잔류염소 농도와 수용가에서 채취하여 실측한 잔류염소 농도를 비교하여 반응상수를 보정하고, 상관분석과 평균제곱근오차(RMSE)를 구하는 등의 통계분석을 수행하여 EPANET 모형이 실제 현장에서 적용 할 수 있는지에 대한 적용 타당성을 검토한다. 실측치에 가장 가깝게 프로그램의 구성을 확정한 후, 대상지역에 대한 관망해석 자료를 이용하여 대상지역에 대한 불소농도를 예측한다. 그리고, 불소농도 변화에 영향을 미치는 수질 인자들에 대해 파악하고, 그 수질 인자들의 변화에 따라 불소농도의 거동과 변화에 대해 분석하며, 정수장의 불소 주입 농도에 변화를 주어 대상지역이 적절한 불소 농도를

유지함으로서 국민의 구강건강 보전에 도움이 되도록 불소 주입농도에 따른 관로내의 불소 농도를 파악한다.

#### 4.2 반응상수의 결정 및 검증

표 4.2.1은 반응상수 값을 결정하기 위해 5개의 절점들에 대하여 수체내에서의 반응상수( $k_b$ )와 관벽에서의 반응상수( $k_w$ )를 변화 시켜가며 반복 예측한 잔류염소 농도를 나타내고 있다. 수체내에서의 반응상수  $k_b$ 는 -1.0부터 -1.2까지 변화시켰고 관벽에서의 반응상수  $k_w$ 는 0에서 -0.2까지를 변화시켜 예측하였으며,  $k_b$ 와  $k_w$  값이 각각 -1.0과 0일 때가 실측한 잔류염소 농도와 예측한 잔류염소 농도의 차이가 가장 적게 나타났다. 반응상수의 적용 타당성을 검증하고 실측된 잔류염소 농도와 가장 잘 맞는 최적의 모형을 만들기 위하여 표 4.2.1에 나타난 반응상수에 대한 통계분석을 수행한 결과 표 4.2와 같이 나타났다. 표 4.2.2를 보면 알 수 있듯이 반복 예측을 실시한 것 중 C에 해당하는 부분에서  $k_b$ 가 -1.0,  $k_w$ 는 -0.0일 때가 절대오차율은 6.39% 절대평균오차(MAE)는 0.022, 평균제곱근오차(RMSE)는 0.025, 상관계수는 0.933, 결정계수는 0.871로 산출되었으므로, 본 연구에서 적용된 최적의 반응상수 값으로 나타났다.

표 4.2.1 반응상수( $k_b$ ,  $k_w$ )의 결정

절점번호	실측치 잔류염소농도	보정치 잔류염소농도(mg/l)				
		A	B	C	D	E
		$k_b=-1.0$ $k_w=-0.2$	$k_b=-1.0$ $k_w=-0.1$	$k_b=-1.0$ $k_w=-0.0$	$k_b=-1.1$ $k_w=-0.0$	$k_b=-1.2$ $k_w=-0.0$
132	0.41	0.37	0.37	<b>0.38</b>	0.35	0.33
144	0.39	0.36	0.37	<b>0.38</b>	0.35	0.33
145	0.30	0.34	0.36	<b>0.32</b>	0.34	0.32
152	0.31	0.37	0.37	<b>0.35</b>	0.35	0.33
158	0.40	0.30	0.34	<b>0.39</b>	0.37	0.35

표 4.2.2 반응상수의 통계분석

통계분석 반응상수	오차율 (%)	MAE	RMSE	상관계수	결정계수
A $k_b=-1.0$ $k_w=-0.2$	15.03	0.046	0.059	0.174	0.030
B $k_b=-1.0$ $k_w=-0.1$	13.85	0.048	0.051	0.189	0.036
C $k_b=-1.0$ $k_w=-0.0$	<b>6.39</b>	<b>0.022</b>	<b>0.025</b>	<b>0.933</b>	<b>0.871</b>
D $k_b=-1.1$ $k_w=-0.0$	11.73	0.042	0.431	0.598	0.358
E $k_b=-1.2$ $k_w=-0.0$	12.10	0.046	0.052	0.598	0.358

### 5. 결과 및 고찰

#### 5.1 불소농도의 분포

대상지역인 광주광역시 상수도 불소화사업을 시행하지 않은 지역으로서 음용수 수질 기준농도인 1.5mg/l 보다 낮은 0.23~0.29mg/l 의 불소농도를 나타내고 있다. 우리나라 정부의 정수장 불소주입 권고농도인 0.8 mg/l 를 각 정수장에 투입하여 EPANET 모형을 이용한 불소 농도를 예측한 결과 24시간평균 불소농도는 0.65mg/l 를 나타내었으며, 표 5.1.1은 각 정수장 절점별 24시간 불소의 평균농도분포를 나타내고 있으며, 표 5.1.2를 살펴보면 최저 잔류불소 농도를 나타낸 절점은 광산구 하남공단에 위치한 절점번호 469번으로 0.47mg/l 의 농도를 보였고, 최고 잔류불소 농도를 나타낸 지역은 서구 월산3동에 위치한 절점번호 82번과 남구 백운2동의 절점번호 112번에서 0.79mg/l 의 농도분포를 나타내고 있음을 알 수 있다.

표 5.1.1 정수장 절점별 24시간 평균 불소농도(mg/l) 표 5.1.2 최고 및 최저 평균 불소농도분포 지역(mg/l)

정수장	절점번호	절점위치	불소농도	절점번호	수용가 위치	불소농도	불소농도 상황	음용수 수질기준
용연	104	남구 동명2동	0.64	82	서구 월산3동	0.79	최고농도	1.5
덕남	180	서구 쌍촌동	0.63	112	남구 백운 2동			
남변	387	광산구 우산동	0.52	469	광산구 하남공단	0.47	최저농도	
각화	483	북구 두암2동	0.64	평균		0.65		
송정	391	광산구 송정동	0.54					
절점 평균농도	<b>0.59</b>	전체 평균농도	<b>0.65</b>					

## 5.2 정수장 주입농도에 따른 잔류불소 농도분포

정수장 주입 불소 농도가 0.6mg/l 일 때는 잔류불소 평균 농도는 0.49mg/l, 주입농도가 0.8mg/l 일 때는 0.65mg/l, 주입농도가 1.0일 때는 0.81mg/l, 주입농도가 1.2mg/l 일 때는 0.97mg/l, 주입농도가 1.5mg/l 일 때는 1.22mg/l 의 농도분포로 예측되었다. 표 5.2는 각 절점별 정수장 주입 불소농도에 따른 24시간 불소의 평균 농도를 나타내고 있다. 우리나라의 불소 투입 권고농도는 0.8mg/l 이지만 치아우식증을 예방하는 불소 농도는 0.7~1.2mg/l 로 보고되고 있는 측면을 고려할 때, 표 5.2.1을 보면 주입농도가 1.0mg/l 일 때가 0.81mg/l 이고, 불소 1.2mg/l 를 투입했을 때는 0.97mg/l 로 예측되고 있으므로 대상지역의 적절한 불소 투입 농도는 1.0~1.2mg/l 로 주입하는 것이 불소의 과다나 과소 섭취가 없는 안전하고 효과적인 주입농도로 예측된다. 그림 5.1은정수장 주입 불소농도에 따른 절점번호 387의 24시간 동안의 불소농도 변화를 보여주고 있다.

표 5.2.1 각 절점별 주입농도에 따른 불소의 농도변화

정수장	절점 번호	정수장 주입 불소농도(mg/l)				
		0.6	0.8	1.0	1.2	1.5
용 연	104	0.48	0.64	0.80	0.96	1.20
덕 남	180	0.47	0.63	0.78	0.94	1.18
남 면	387	0.39	0.52	0.64	0.77	.97
각 화	483	0.48	0.64	0.80	0.96	1.20
송 정	391	0.40	0.54	0.67	0.81	1.01
절점평균		0.44	0.59	0.74	0.88	1.10
전체평균		<b>0.49</b>	<b>0.65</b>	<b>0.81</b>	<b>0.97</b>	<b>1.22</b>

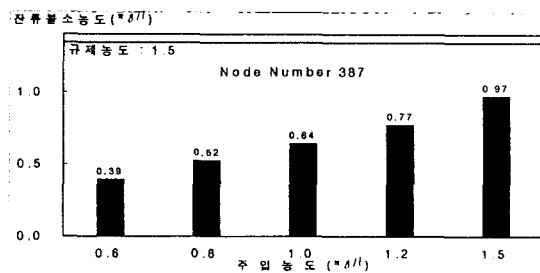


그림 5.1 정수장 불소 주입농도에 따른 불소의 농도변화

## 6. 결 론

본 연구에서는 대상지역의 적절한 정수장 주입 불소농도를 알기 위하여 정수장에서 불소의 주입량을 변화시켜 가며 EPANET 모형을 이용하여 상수 관로내에서의 불소농도를 예측한 결과, 우리나라의 불소 투입 권고 농도인 0.8mg/l 의 불소를 정수장에서 주입하였을 때, 대상지역의 평균 불소농도가 0.65mg/l 로 나타나 음용수 수질 기준 농도인 1.5mg/l 보다 낮게 예측되었으며, 정수장의 주입 불소농도를 0.6mg/l, 1.0mg/l, 1.2 mg/l, 1.5mg/l 로 변화시켰을 때, 각각 0.49mg/l, 0.81mg/l, 0.97mg/l, 1.22mg/l 의 불소농도 분포를 나타내었다. 한편, 상수도 불소화사업의 최대효과를 얻기 위하여 불소를 적정하게 섭취하여야 하지만, 불소를 과다하게 섭취할 경우에는 반상치 및 골연화증 등을 유발할 수 우려가 있으므로 우리나라는 불소의 규제농도는 1.5 mg/l, 허용불소이온 농도는 1.0mg/l 로 규정하고 있으므로 정수장에서 불소를 1.0mg/l 과 1.2mg/l 농도로 주입하였을 때, 각각 0.81mg/l 과 0.97mg/l 농도분포를 나타내고 있으므로 정수장 불소 주입농도를 1.0~1.2mg/l 정도로 유지한다면 치아우식증을 예방하는데 효과적으로 이용할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 우리나라의 치아우식증 발생율은 계속 증가하고 있는 추세이므로 상수도 불소화사업은 예방의학차원의 국민 구강 보건증진에 효과적인 대책사업으로 사료되나, 불소 섭취가 치아뿐만 아니라, 인체 전반에 걸친 국민 건강에 대한 안전성이 우선적으로 확보된 이후에 상수도 불소화사업을 추진하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

## 7. 참고문헌

- 1) Lewis A. Rossman, "EPANET USERS MANUAL", Risk reduction engineering laboratory office of research and development u.s. environmental protection agency Cincinnati, 1994.
- 2) 한봉석, 최유진, "상수도수 불소화 사업에 관한 조사연구", 대한구강보건학회지, Vol. 9, No. 1, pp.135~143, 1985.
- 3) 신금백, "한국인 치아경조직중 불소농도에 관한 연구", 서울대학교 석사학위 논문, 1979.