

추적자 실험에 의한 정수지의 소독 효율(CT value) 평가와 염소 투입량 최적화에 관한 연구

현준호 · 김영만* · 김영상**

한국수자원공사 수자원연구소 수돗물종합검사센터,
*한국과학기술연구원 특성분석센터,
**고려대학교 자연과학대학 화학과

Study of Estimating Disinfection Efficiency(CT value) and Optimizing Chlorine Dosage by Tracer Test

Joon-Ho Hyun, Young-Man Kim* and Young-Sang Kim**

Korea Water Resources Corporation, 462-1, Jeonmindong, Yuseonggu, Daejeon, 305-730, Korea
*Advanced Analysis Center, Korea Institute of Science and Technology, Cheongryang, Seoul 130-791, Korea
**Department of Chemistry, Korea University, Jochiwon, Choongnam 339-700, Korea

Concentration \times Time (CT) value is the standard for controlling disinfection process, and reducing micro-organisms. To achieve the optimization of disinfection efficiency, all of the water treatment plants should be measured in CT values, and use one of the methods of controlling disinfectants in United States. However, despite chlorination is the base disinfection treatment for the water treatment plant in Korea, it has no regulation for disinfection efficiency. It only has a rule of monitoring 0.2 mg/l residual chlorine concentration of effluent at disinfection process. The objective of this study is introducing CT values and estimating disinfection efficiency on chlorine process in the huge water treatment plant which produces approximately 730,000 ton/day to consumers by the tracer test using a solution of H_2SiF_6 to characterize CT values. In the worst case condition of pH 8.3, temperature 0.5°C and residual chlorine concentration 0.9 mg/l, the calculated value of CT_{cal}/CT_{req} is 0.61~1.82 and T_{10}/T value is 0.2~0.5.

Key words: estimating disinfection efficiency, chlorine dosage, tracer test

1. 서 론

소독의 목적은 질병을 유발시킬 수 있는 여러 가지 형태의 미생물 또는 병원균의 생성 및 증식을 억제하는 것이다. 소독제의 투입 방법 선정시 소독제의 실용성, 소독제의 잔류와 접촉시간의 관계, 부산물의 형성과 그 함량, 소독 대상인 물의 수질, 소독제의 안정성 문제, 비용 등이 고려되어야 한다. 정수장의 경우, 화학소독제를 주입하는 목적은 1차적으로 원수에 존재 가능한 병원성 미생물의 불활성화이며 이에 따른 소독부산물 생성은 필수 불가결이라 할 수 있지만, 현재 소독 공정 관리시 투입하는 소독제와 원수의 성질에 의한 소독 효율을 충분히 고려하지 않고 최종 유출수에

서의 잔류 염소 농도로만 관리하고 있는 실정이다.

미국의 표류수 처리법(surface water treatment rule)에는 탁도와 미생물에 대한 규정에서 탁도는 0.5 NTU(nephelometric turbidity units)를 95%이상 유지하여야 바이러스(virus)와 지아디아(Giardia)라는 원생동물을 각각 99.99%, 99.9% 제거할 수 있다고 한다.¹⁻²⁾ 이러한 바이러스와 지아디아는 개별적으로 분석하는데 힘들고, 또한 분석 비용이 많이 들어 처리 방법에 대한 규정으로 대체되어 있으며, 국내 정수장에서는 미생물에 대한 기준으로 일반세균과 총대장균에 대해서만 규정되어 있고 미생물의 재활성화를 막기 위해 관말에서 잔류염소를 0.2 mg/l 이상 유지하도록 되어 있다.³⁾ 하지만, 이것으로는 정수장에서 준수

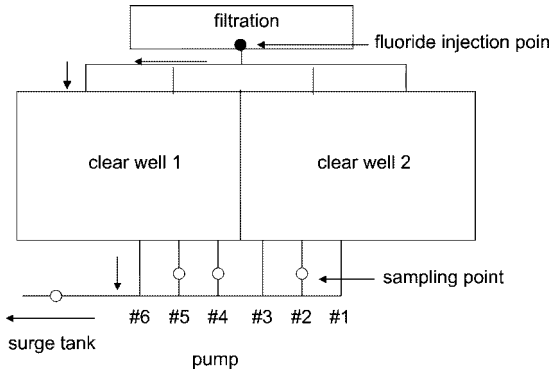


Fig. 1. The scheme for the test.

하여야 할 적정 소독능에 대한 규정이 매우 미약하다고 할 수 있다.

적정 미생물 사멸을 위해 소독제 농도와 소독제의 미생물 접촉시간에 대한 규정을 소독능(CT, disinfectant conc. × contact time)으로 표현할 수 있으며^{4,6)} 값은 소독제의 종류, 온도, pH 등에 영향을 받으므로 각각의 조건에서 소독능 규정을 달리 할 수 있다. 정수장에서 소독 공정을 평가하기 위한 소독능의 T는 정수 공정의 구조적 형태에 의해 90%의 소독제가 남아있는 시간 T_{10} 값으로 나타낼 수 있는데, 현재 반응기에서 유체의 흐름과 사수부의 존재, 혼합정도 등을 파악하기 위한 연구가 진행되고 있다. 이러한 적정 소독능을 얻기 위해 사용하는 추적자로서 플루오르, 나트륨 등을 사용하며, 추적자를 투입하여 유출되는 시간에 따른 농도를 측정 한 후, 투입한 추적자의 반응조(정수지)내에 90%가 남아있을 시간을 계산하여 소독제의 농도(잔류염소 농도)를 곱함으로써 소독능을 계산하게 되고, 이러한 실험을 거쳐 계산된 소독능($CT_{calculated}$)을 기준값($CT_{required}$)에 비교하여 적정 소독능을 평가하게 된다.

본 연구에서는 추적자(tracer)로 현재 플루오르를 투입하고 있는 정수장에서 사용하는 것과 동일한 헥사플루오르규산(H_2SiF_6)을 사용하여 여과지 공동 집수정에 투입함으로써 투입시 발생할 수 있는 오차를 최소화하였다. 또한 정수지 말단에 배치되어 사용중인 펌프와 집수탱크(surge tank)로 가는 관에서 시료 채취를 함으로서 정수지내의 유체 흐름을 다양한 각도에서 파악하여 소독능 평가를 함으로서 최적의 CT값을 구현하여 염소투입량을 조절하기 위한 자료로 사용하며, 동시에 국민 건강을 위한 수도물 플루오르화 사업의 기본자료로 활용하고자 한다.

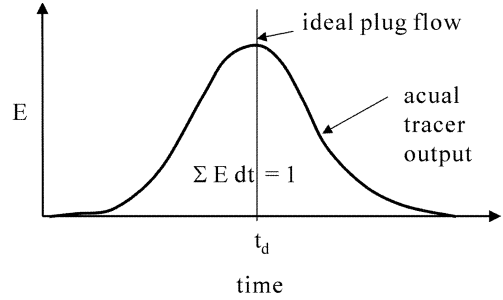


Fig. 2. E-curve at the ideal condition.

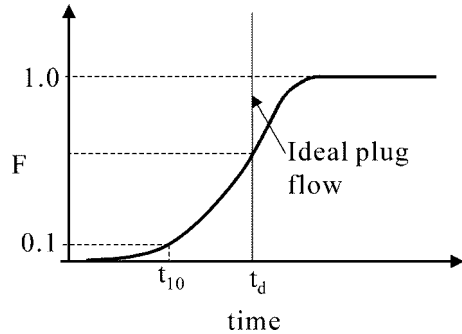


Fig. 3. F-curve at the ideal condition.

2. 실험

본 실험을 위해 하루 70만톤 이상을 생산하는 정수장에서 원수 유입량을 10,000 m^3/h 로 조절하였고, Fig. 1에서 보는 바와 같이 유출 송수 펌프는 체수 장소로 정한 펌프 #2, #4, #5를 가동하도록 하였다. 염소투입기(후염소)는 정수지 입구전단 각 유입구마다 설치되어 있으며 정수지내 도류벽(정류벽)은 설치되어 있지 않고 펌프 이후에 집수탱크(surge tank)가 설치되어 정수지에서 펌프된 물들이 집수탱크에 모아져 수용가로 보내지게 된다.

추적자로서 헥사플루오르규산을 사용하였으며 투입 방법은 pulse-input method를 적용하고 투입위치는 여과수의 완전 혼합이 이루어지는 공동 집수정에서 실시하였다.

투입방법에 따른 실험결과와 처리는 반응조(정수지)를 통과하는 유체(정수) 흐름에 대한 시간분포를 나타내는 residence time distribution(RTD)⁷⁾을 exit age distribution이라 하여 E로 표기하고 추적자의 유출되는 농도를 농도-시간 곡선의 면적으로 나눈 값으로 나타낸

Table 1. Conditions for experiments.

Exp.	Inflow (m ³ /h)	Input weight (g)	Pump	Recovery weight (g)	Recovery rate (%)	Temp. (°C)	pH	Turbidity (°)	Residual free chlorine
1	10,000	10,000	# 2	9950	100	22	7.3	0.7	0.5
			# 4	6470	65	22	7.4	1.1	0.7
			# 5	10840	108	22	7.4	1.1	0.9
2	10,000	21,299	# 2	22833	107	22	7.0	0.1	0.9
			# 4	20639	97	22	7.1	0.1	1.3
			# 5	25665	120	22	7.1	0.1	1.6
			TW	26411	124	22	8.0	0.1	1.1
3	10,463	21,230	#2	30145	142	3	7.5	0.4	0.6
			#5	40991	193	3	7.6	0.9	0.8
			TW	23354	110	3	7.2	0.2	0.8

다. 그리고 작성된 E curve를 적분치로 계산하여 만든 곡선을 F curve라고 하며, F curve에서 T₁₀값을 결정하게 된다. 두 곡선간의 관계식은 다음의 식과 같고 이상적인 상태의 곡선은 Fig. 2, Fig. 3과 같다.

$$F = \int_0^t E dt = 1 \quad (1)$$

Table 1에는 각 실험에 대한 조건을 나타내었다. 투입량은 유출농도 기준으로 1ppm이하가 되도록 계산하여 투입하였고 회수율은 최고 플루오르 농도가 나오는 시간의 1시간 전·후로 수위를 평균으로 정수지 체적을 구한 후, 계산된 체적에 최고 플루오르 농도를 곱하여 나오는 값으로 투입량과 비교하여 계산하였다. 시료 채취는 투입 볼소 농도의 최고점이 나타나는 예상시간대에는 5분 간격으로 하고 그 외는 10분 간격으로 평균 채취 시간의 2배되는 시간 동안 시료를 채취하였다. 플루오르(F-)의 분석⁸⁾은 이온크로마토그래프(DX500, DIONEX, USA)로 플루오르를 분석하기 위한 최적 조건 하에서 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

1차 실험에 의한 E, F curve는 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 4를 보면 최고 농도 분율이 나오는 시간대가 펌프 #2, #4, #5에 따라 다른 것으로 보아 실제 투입된 염소가 정수지내의 자연적인 흐름에 의해 혼합되지 않을 것이라고 판단할 수 있었다. Fig. 5의 F curve에서 T₁₀값은 펌프 #2, #4, #5 순서로 76분, 91분, 49분의 값으로 계산되었다. 정수지 구조상 펌프 #5와 펌프 #2에서의 실험결과는 비슷하여야 함에도 불

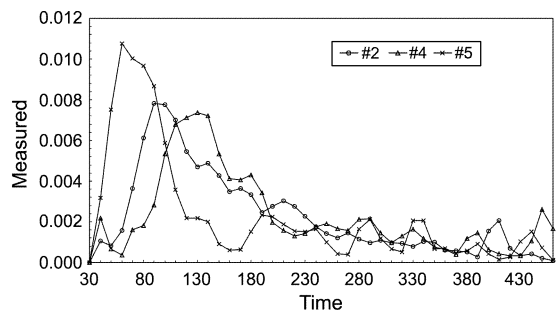


Fig. 4. E curves for the first experiment.

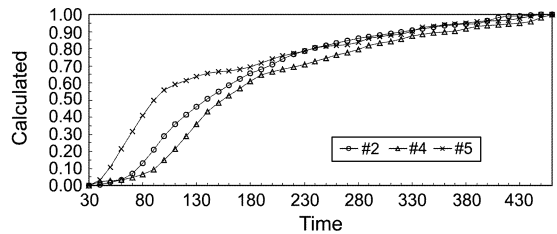


Fig. 5. F curves for the first experiment.

구하고 틀린 것은 여과지 침수정에서 정수지로 들어가는 관망의 문제가 아닐까 생각된다.

2차 실험에 의한 E, F curve는 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 6의 펌프 #2의 E curve(-o-)를 보면 플루오르 농도 분율이 일정해지는 구간이 있는데, 이것은 정수지내의 구조상 흐름이 원활하지 못한 상태에서 펌프로 바로 유출되지 못하고 유지되는 구간만큼 비슷한 플루오르 농도가 유출되었기 때문이라 생각된다. 또한 TW의 E curve(-◆-)를 보면 세 개의 봉우리를 볼 수 있는데, 이것은 펌프 #5, #4, #2의 순서로 나타나

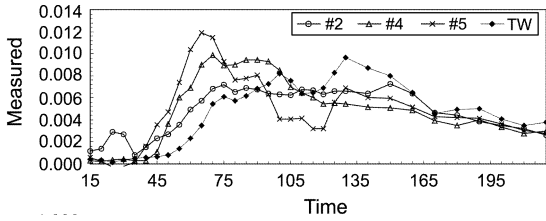


Fig. 6. E curves for the second experiment.

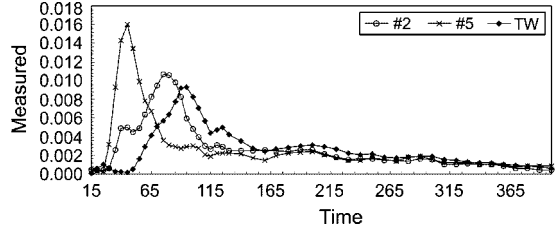


Fig. 8. F curves for the third experiment.

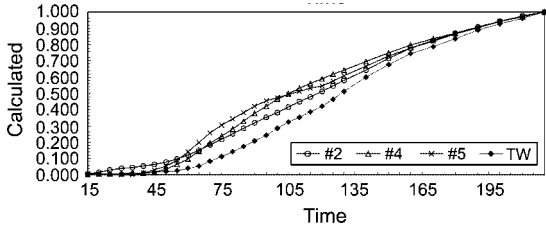


Fig. 7. F curves for the second experiment.

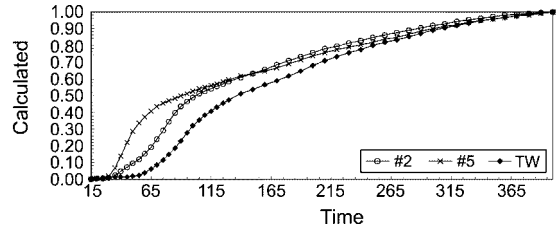


Fig. 9. F curves for the third experiment.

는 추적자의 흐름으로 볼 수 있고 이것으로부터 정수지에서 집수탱크까지 추적자가 완전 혼합되지 못하고 유출되는 것으로 볼 수 있다. Fig. 7의 F curve에서 계산된 T_{10} 값은 펌프 #2, #4, #5, TW 순서로 57분, 60분, 57분, 73분의 값으로 계산되었으며, 펌프에서 측정된 체류시간은 비슷한 값으로 계산되었다. 이것은 전체적으로 보았을 때, 정수지 내에서의 유체 흐름이 1차에 비해 일정하게 흐르고 있다고 판단할 수 있다.

3차 실험에 의한 E, F curve는 Fig. 8과 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 8의 E curve에서 Fig. 6의 TW 그래프(-◆-)를 비교해 볼 때, 3차 실험시 펌프별로 구분할 수 있는 봉우리를 확인 할 수 없는데, 이것은 정수지 운영중 펌프 #4의 수리로 인해 일정하게 정수지에서 집수탱크로 보내지 못했기 때문이라고 추정된다.

Fig. 9의 F curve에서 계산된 T_{10} 값은 펌프 #2, #5, TW 순서로 52분, 38분, 69분의 값으로 계산되었는데, 2차 실험과 달리 T_{10} 값의 차이가 펌프별로 큰것은 일정한 실험 조건을 갖추지 못한 상태(펌프수리)에서 실험을 실시하였기 때문이라 판단된다.

4. 결 론

추적자 실험을 통하여 정수장의 소독 공정 효율에 대해서 살펴보았다. Table 2에서, CT_{req} 는 최악의 조건⁹⁾(pH 8.3, 수온 0.5°C, 잔류염소 0.9 mg/l)에서 결정된 값 50이며, CT_{cal}/CT_{req} 의 비는 0.61~1.61의 값으로 계산되었다. 정수지 구성 효율을 나타내는 T_{10}/T 의 비는 0.2~0.5로 계산되었다. 도류벽이 없는 정수지 내에서도

Table 2. Results for experiments.

Exp.		T (min)	T_{10} (min)	T_{10}/T Ratio	CT_{cal} (ppm x min)	CT_{req}	CT_{cal}/CT_{req}
1	#2	189	76	0.4	38.0	50	0.76
	#4		91	0.5	63.9		1.28
	#5		49	0.2	44.1		0.88
2	#2	189	57	0.3	51.3	50	1.03
	#4		60	0.3	78.0		1.56
	#5		57	0.3	91.2		1.82
	TW		73	0.4	80.3		1.61
3	#2	198	52	0.3	31.2	50	0.62
	#5		38	0.2	30.4		0.61
	TW		69	0.3	55.2		1.10

전체적으로 소독효율을 만족하는 것으로 나타났다. 특히 2차 실험시 1, 3차에 비해 잔류염소량이 높아 소독효율이 좋은 것으로 계산되었지만, 소독능 값이 기준값을 초과할 때, 여러 가지 소독 부산물이 발생할 가능성이 높아지기 때문에 THM(trihalomethane)등의 연구가 병행되어야 한다. 최악의 조건에서의 CT_{req} 값에 대한 보정이 필요하며, 계절별로 추적자 실험을 실시하여 주변 환경에 맞는 소독능 값을 결정하여 그것을 기준으로 소독제의 투입량을 조절하여야 한다. 또한 이상적인 혼합이 이루어지도록 도류벽을 설치하거나 정수지로 유입되는 여과 수량을 적정 배분하도록 해야 한다.

참고문헌

- 1) 수자원 연구소, “국외 전문가 초청 세미나 발표문집”, 1997, 서울, 한국.
- 2) AWWA, “Guidance Manual for Compliance with the Filtration and Disinfection Requirements for Public Water Systems using Surface Water Sources”, 1991, Denver, CO, USA.
- 3) 환경부, “상수도 시설기준”, 1997, pp. 280~281, 서울, 한국.
- 4) Susan M. Teefy and Philip C. Singer, *J. AWWA*, 1990, 82(12), 88.
- 5) USEPA, “Disinfection Profiling and Benchmarking Guidance Manual”, 1999, pp. 3-3~3-8, Washington, D.C., USA.
- 6) Charles N. Haas, Josh Joffe, Mark Heath, Joseph Jacangelo, *IAWQ 19th Biennial International Conference*, 1998, 8, 164.
- 7) Mark M. Bishop, J. Mark Morgan, Brendon Cornwell, and Donald K. Jamison, *J. AWWA*, 1993, 85(3), 68.
- 8) APHA, AWWA, WEF, “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewaters”, 18th Ed., 1992, pp. 4-53, Washington, D.C., USA.
- 9) 한국수자원공사, “원수수질특성에 따른 수처리 및 공정 관리 최적화 방안(1차)”, 1995, 서울, 한국.