

소독제 농도, pH, 온도, 암모니아 농도, 부유물질이 강우 월류수 염소 소독에 미치는 영향

Effects of Disinfectant Concentration, pH, Temperature, Ammonia, and Suspended Solids on the Chlorine Disinfection of Combined Sewer Overflow

김 상 현[†]
Sang-Hyoun Kim[†]

대구대학교 환경공학과

Department of Environmental Engineering, Daegu University

(Received October 1, 2014; Revised October 28, 2014; Accepted October 29, 2014)

Abstract : The treatment of combined sewer overflow (CSO) is one of potential concerns in domestic wastewater treatment in Korea due to the pre-announce of CSO regulations. This work investigated the effects of disinfectant (NaOCl) concentration (0.11 to 4.0 mg Cl₂/L), pH (6.5 to 8.0), temperature (15 to 25°C), ammonia (10 to 41 mg N/L), and suspended solids (91 to 271 mg SS/L) on the chlorine disinfection of CSO. The effect of NaOCl concentration on the pseudo-1st order reaction rate for total coliform inactivation was described well with a saturation-type model with the half-velocity constant of 1.212 mg/L. The total coliform inactivation reaction rate decreased with SS and pH, and increased with temperature. Ammonia in the examined range did not affect the disinfection kinetics. A chlorine contact tank with the injection chlorine level of 1 mg Cl₂/L and the hydraulic retention time of 1.25 min is estimated to reduce total coliform from 1 × 10⁵ MPN/mL to 1,000 MPN/mL at 271 mg SS/L, 15°C, and pH 8.0. Chlorine would be a proper option for the disinfection of CSO.

Key Words : Combined Sewer Overflow, Total Coliform, Disinfection, Sodium Hypochlorite, Suspended Solids

요약 : 하수처리시설 초과유량에 대한 처리 규제 입법 예고로 인해 강우 월류수 처리에 대한 관심이 증가하고 있다. 본 연구에서는 강우 월류수 염소(차아염소산나트륨) 소독 시 소독제 농도(0.11-4.0 mg Cl₂/L), pH (6.5-8.0), 온도(15-25°C), 암모니아 농도(10-41 mg N/L), 부유물질(91-271 mg SS/L)이 대장균군수 감소 속도에 미치는 영향을 고찰하였다. 차아염소산나트륨 농도 효과는 반속도 상수가 1.212 mg Cl₂/L인 saturation-type model로 잘 묘사되었다. 소독 반응 속도는 SS와 pH 증가에 따라 감소되는 반면, 온도에 따라서는 증가하였고, 암모니아 농도에는 영향을 받지 않았다. 월류수 유입 조건을 1 × 10⁵ MPN/mL, 271 mg SS/L, 15°C, pH 8.0로 가정할 때, 염소 주입 농도 1 mg/L, 수리학적 체류시간 1.25 분인 염소 소독조를 통해 입법예고된 수질 기준의 1/3 수준인 대장균군수 1,000개/mL를 달성할 수 있을 것으로 계산되어, 염소 소독이 강우 월류수 소독에 유효하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

주제어 : 강우 월류수, 대장균군, 소독, 차아염소산, 부유물질

1. 서론

처리장 용량을 초과하는 하수는 미처리된 상태로 하천이나 해역으로 방류되며 이를 강우 월류수라고 한다. 강우 월류수의 유량·농도·중평균농도는 Table 1에 도시한 바와 같이 청천시 하수처리장 유입수와 유사하거나 높다. 강우 월류수의 영향을 최소화하기 위해 하수처리장 내의 최초 침전지는 원칙적으로 계획오수량(IQ)의 3배(3Q)를 처리할 수 있도록 설계·운전되어야 한다. 그러나 연중 대부분을 차지하는 청천시를 기준으로 최초침전지를 운전, 관리하는 경우가 대부분으로 강우 시 짧은 시간에 고농도로 유입되는 초기 강우 월류수를 적합하게 처리하기에는 어려움이 있으며, 실제로도 대부분의 하수처리장에서는 강우 시 오염부하 및 수리학적 부하 증가로 인한 하수처리장 운영의 어려움을 우려하여 IQ 이상의 유량은 유입부에서 차단시키고 있어, 하수처리장 설치만으로는 수질 개선에 한계가 존재하는 이유가 되고 있다.¹⁾

Lee²⁾는 국내 합류식 하수도 설치 지역의 경우 SS의 17.3%, COD(화학적 산소요구량)의 5.9%가 강우 월류수 형태로 방류수역으로 유출되는 것으로 조사되었다. 또한, 4대강 사업으로 인하여 합류식하수도 지역의 미처리 방류하수에 의한 수질오염이 가속화될 우려가 있다는 지적이 높아지고 있다. 이에 따라, 환경부는 하수처리시설 초과유량(IQ 초과 3Q 이하)에 해당하는 강우 월류수의 방류 기준을 I, II 지역 기준 BOD 60 mg/L, 대장균군수 3,000개/mL을 적용 일자 2019년 1월 1일로 입법예고하였다.³⁾ 이에 따라, 강우 월류수를 대상으로 한 최초 침전지의 개선 또는 이를 보완하는 물리화학적 처리 시설 설치를 통한 BOD 저감 방안(1차 처리)과 함께, 강우 월류수 내 대장균군수를 저감할 수 있는 소독 방안의 마련이 필요하다. 하수처리장에 설치된 기존 소독 공정은 2차 또는 고도 처리를 거쳐 SS 등 소독을 방해하는 물질을 거의 함유하고 있지 않은 방류수를 대상으로 설계·운전되고 있어, 1) 간헐적으로 2) 짧은 시간에

[†] Corresponding author E-mail: sanghkim1@daegu.ac.kr Tel: 053-850-6691 Fax: 053-850-6699

유입되고 3) 부유물질(SS), 유기물(BOD) 등 오염물질 농도가 높은 월류수에는 적합하지 못해 별도의 공정이 필요하다.⁴⁾ 강우 시 합류식하수도가 설치된 지역에서 하수강우 월류수를 대상으로 적용 가능한 소독 공정으로는 염소 소독, 자외선(UV), 오존 등이 있으며, 이 중 부유물질 등 방해 물질을 고려할 때 일반적으로 가장 효과적인 공정인 염소 소독인 것으로 보고되고 있다.⁵⁾ 본 연구는 강우 월류수 염소 소독 시 소독제 농도, 부유물질, 온도, pH, 암모니아 농도가 대장균수 감소 속도에 미치는 영향을 실험을 통해 고찰하고, 설계 인자를 도출하는 것을 목적으로 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 소독 실험

처리 대상 시료는 Table 1의 문헌연구 결과를 바탕으로, 본 소독 연구의 처리 대상인 1차 처리된 강우 월류수를 모사하기 위해 G시 소재 N천변의 우수토실에서 강우시 월류수를 채취하여 사용하였다. 실험에 사용한 월류수의 특성은 Table 2와 같았다.

Table 1. Reported event mean SS, BOD and *E. Coli* concentrations in combined sewer overflows

Country	SS (mg/L)	BOD (mg/L)	<i>E. Coli</i> (MPN/mL)	Nitrogen (mg N/L)	References
USA	306-675	75-328	$1.2 \times 10^1 - 9.2 \times 10^6$	1-16 as TN	Kothandaraman, 1972 ⁶⁾
	184	-	-	3 as TKN	Brezonik & Stadelmann, 2002 ⁴⁾
	-	-	1×10^4	-	US EPA, 1973 ⁷⁾
Korea	109-387	59-279	-	3-5 as TKN	Ministry of Environment, 2011 ¹⁾
	49-552	37-106	-	2-23 as TKN	Lee & Bang, 2000 ⁸⁾
	133-283	75-113	-	11-25 as TN	Kim, 2008 ⁹⁾
China	91-529	96-178	-	8 to 22 as NH ₃	Li et al., 2008 ¹⁰⁾

Table 2. Combined sewer overflow characteristics used in the chlorine disinfection test

Total coliform (MPN/mL)	SS (mg/L)	COD _{Cr} (mg/L)	Ammonia (mg N/L)	pH
$1.3-3.8 \times 10^4$	87-271	110-225	11-32	6.7-7.0

Table 3. Experimental conditions to examine the effects of NaOCl Concentration, pH, temperature, ammonia, and SS

Examined parameter	Total coliform (MPN/mL)	NaOCl (mg Cl ₂ /L)	pH	Temp. (°C)	Ammonia (mg N/L)	SS (mg/L)
NaOCl concentration	$1.3-1.5 \times 10^4$	0.11-4.0	7.0	25	20-32	98-110
pH	1.7×10^4	4.0	6.5-8.0	20	14	87
Temperature	2.6×10^4	4.0	7.0	15-25	10	123
Ammonia	3.8×10^4	4.0	7.0	20	11-41	92
SS	$1.8-2.4 \times 10^4$	2.0	7.0	20	11-19	91-271

간헐적으로 운전되는 강우 월류수 소독의 경우 저장의 용이성을 고려할 때 액체 소독제가 보다 유리하다고 판단하여, 염소 소독제로 차아염소산 나트륨(Sigma-Aldrich)을 사용하였다.⁵⁾ 월류수의 온도는 물중탕을 이용하여 실험 직전에 15, 20, 25 ± 1°C로 조절하여 사용하였다. pH는 1 M NaOH와 1 M HCl을 통해 6.5, 7.0, 7.5, 8.0으로 조절하여 사용하였으며, 이때 허용 오차는 ±0.1이었다. SS 농도 영향은 SS가 다른 세 종류의 월류수를 총대장균수를 유사한 수준으로 혼합하는 방법으로 고찰하였다.

소독 실험은 1 L beaker를 Jar tester (JT6, MTop)를 이용하여 141 rpm으로 교반하면서 회분식으로 수행하였다. 실험 도중 별도의 온도 조절은 하지 않았으나, 실험 종료 시까지 초기 온도 대비 ±1°C 내에서 유지됨을 확인하였다.

암모니아 농도 영향을 고찰할 때에는 NH₄Cl을 추가로 주입하였다. NaOCl 농도, 온도, pH, 암모니아 농도, 부유물질 별 영향은 Table 3과 같은 실험 조건에서 평가되었다.

2.2. 분석 및 해석

총대장균군 측정에는 3M Petrifilm™ coliform count plate를 이용하였으며, 접종 후 35 ± 1°C에서 48 ± 2 h 동안 배양 후 계수하였다. Cl₂ 농도는 DPD colorimetric method로 측정하였으며 흡광도 측정에는 HS-3300 (Humas)를 사용하였다. SS, COD, ammonia는 Standard Methods (APHA, 1998)에 따라 측정하였다.

소독 시간에 따른 총 대장균군수 변화는 다음의 일차 반응 속도식(식 (1))을 통해 해석되었으며, 이를 통해 구해진 총대장균수 감소 반응 일차 속도상수를 본 연구의 소독 효율로 정의하였다.

$$\frac{dN_t}{dt} = -kN_t \quad (1)$$

여기서, dN_t/dt : 시간에 따른 총 대장균군수 변화율
 k : 소독 효율, 총대장균수 감소 반응 일차 속도 상수(min⁻¹)
 N_t : 시간 t에서의 미생물 개체수(MPN/mL)
 t : 시간(min)

NaOCl 농도가 소독 효율에 미치는 영향은 식 (1)에서 구해진 일차 반응 속도 상수로부터 saturation-type model(식 (2))을 이용하여 정량화 하였다.

$$k = k_{0,Cl} \frac{C}{K + C} \tag{2}$$

여기서, C : NaOCl 농도(mg Cl₂/L)
 $k_{0,Cl}$: 소독제 농도에 따른 최대 일차 반응 속도 상수(min⁻¹)
 K : Cl₂ 농도에 대한 반 속도 상수(mg Cl₂/L)

NaOCl에 함유된 차아염소산염(OCl⁻)은 pH에 따라 일부가 차아염소산(HOCl)으로 존재한다(식 (3)). 상온에서의 pK_a 값이 7.5-7.8이므로 중성영역에서 pH가 조금만 변하여도 HOCl과 OCl⁻의 분율이 크게 차이가 난다. 일반적으로 HOCl이 OCl⁻에 비해 소독 효과가 40-80배 높은 것으로 알려져 있다.⁵⁾

$$\frac{[HOCl]}{[HOCl] + [OCl^-]} = \frac{1}{1 + 10^{pH - pK_a}} \tag{3}$$

본 연구에서는 식 (3)을 참조하여 pH가 NaOCl의 소독 효율에 미치는 영향을 식 (4)와 같은 멱함수로 모델링하였다.

$$k_{pH} = ab^{pH - pK_a} \tag{4}$$

여기서, pK_a : 차아염소산 해리 상수(7.64 at 15°C, 7.59 at 20°C, 7.53 at 25°C)
 k_{pH} : 특정 pH에서의 일차 반응 속도 상수(min⁻¹)
 a : pH 영향 계수(min⁻¹)
 b : pH 영향 밀수

온도가 소독 반응 속도에 미치는 영향은 van't Hoff-Arrhenius 식(식 (5))에 의해 해석되었다.

$$\frac{k_T}{k_{293}} = \frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{293} \right) \tag{5}$$

여기서, T : 온도(K)
 k_T : 특정 온도에서의 일차 반응 속도 상수(min⁻¹)
 k_{293} : 20°C에서의 일차 반응 속도 상수(min⁻¹)
 E_a : 소독 반응 활성화에너지(J/mol)
 R : 기체 상수, 8.314 J/mol.K

SS가 소독 반응 속도에 미치는 영향은 지수 감소 함수(식 (6))으로 해석되었다.

$$\frac{k_{ss}}{k_{soluble}} = e^{-m(SS)} \tag{6}$$

여기서, SS : 부유물질 농도(mg/L)
 $k_{soluble}$: SS가 없을 때의 일차 반응 속도 상수(min⁻¹)

k_{ss} : 특정 SS 농도에서의 일차 반응 속도 상수(min⁻¹)
 m : SS 영향 계수(L/mg)

3. 결과 및 고찰

3.1. 소독 조건 별 소독 반응 속도 영향

본 연구에서 적용된 모든 실험 조건에서 시간에 따른 총 대장균군수 변화는 일차 반응식으로 잘 묘사되었다(R² > 0.927).

소독 반응 속도는 NaOCl 농도에 따라 높아지다가 점차 수렴하는 경향을 보였으며, Fig. 1에 나타난 바와 같이 saturation-type model(식 (2))로 잘 묘사되었다(R² = 0.982).

pH 증가는 소독 효율의 감소로 이어졌으며, HOCl의 소독 효과가 OCl⁻보다 높기 때문에 발생한 현상으로 사료된다. pH가 소독 효율에 미치는 영향은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 멱함수인 식 (4)로 적절히 묘사되었다(R² = 0.878).

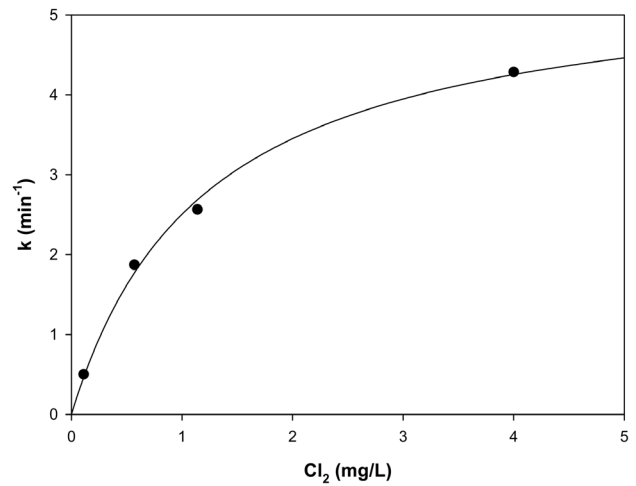


Fig. 1. Effect of NaOCl concentrations on the pseudo-1st order reaction rate for total coliform inactivation.

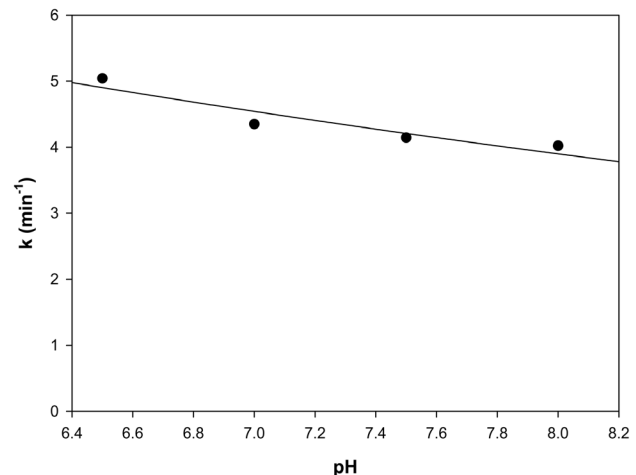


Fig. 2. Effect of pH values on the pseudo-1st order reaction rate for total coliform inactivation

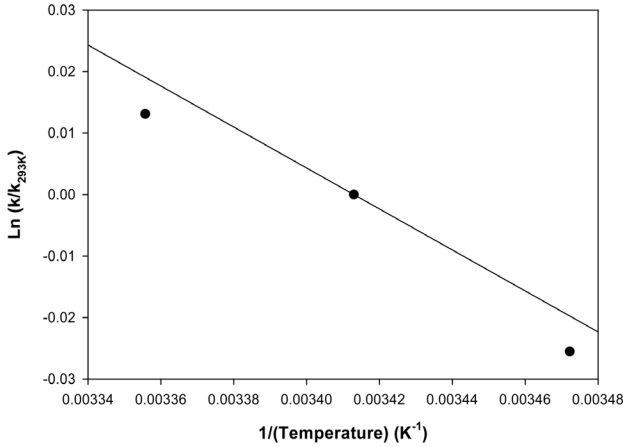
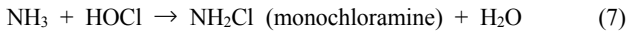


Fig. 3. Effect of temperature on the pseudo-1st order reaction rate for total coliform inactivation.

온도가 반응 속도에 미치는 영향은 van't Hoff-Arrhenius 식 (5)에 의해 잘 묘사되었으며($R^2 = 0.911$), 이를 Fig. 3에 도시하였다. 소독 반응 활성화에너지(E_a)는 2.77 kJ/mol로 계산되었다.

수중에 암모니아가 존재할 경우, 차아염소산은 식 (7)과 같이 반응하여 클로라민을 형성할 수 있다.



클로라민 역시 소독 효과가 있으나 차아염소산은 물론 차아염소산염에 비해서도 소독 반응 속도가 느리므로, 차아염소산이 대장균 비활성화 보다 클로라민 생성에 먼저 사용된다면 암모니아의 존재가 염소 소독의 반응 속도를 저해시킬 수 있다. 따라서 본 연구에서는 암모니아 농도를 11-41 mg N/L로 변화시키면서 실험을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 4에 도시하였다. 일반적으로 알려진 바와는 달리, 본 연구에서 소독 효율에 유의미한 영향을 주지 않았다. 이는

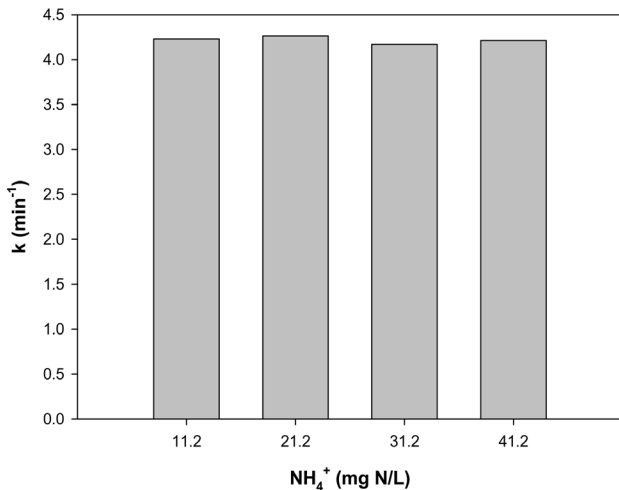


Fig. 4. Effect of ammonia concentration on the pseudo-1st order reaction rate for total coliform inactivation.

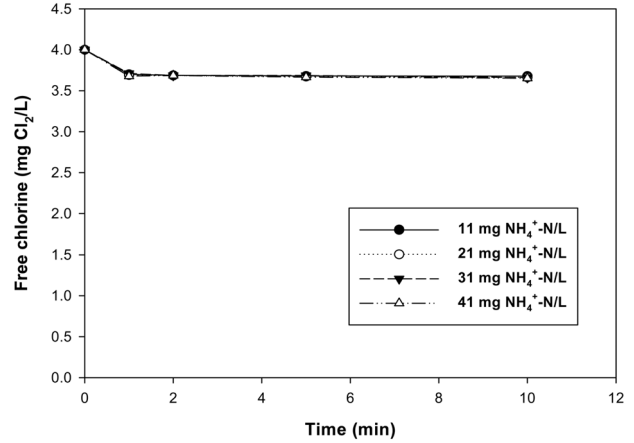


Fig. 5. Free chlorine concentrations during the batch-type disinfection experiment at different ammonia levels.

Fig. 5에 나타난 바와 같이 주입한 염소의 90% 이상이 소독 반응 시간 동안 클로라민이 아닌 자유 염소로 남아 있고, 그 분율이 암모니아 농도와 무관하였기 때문인 것으로 판단된다. 암모니아와 염소와의 반응이 활발하게 진행되지 않은 이유는 짧은 반응 시간을 비롯한 실험 조건이 원인이 된 것으로 보인다. 결론적으로 본 실험 조건과 유사한 환경을 전제한다면 강우 월류수에서의 암모니아 농도 변화는 소독 공정 설계 시 고려되지 않아도 무방하리라 사료된다.

기존 소독 공정이 적용되던 2차(또는 고도) 처리 유출수와 강우 월류수의 가장 큰 차이점은 부유물질(SS) 농도이다. 기존 소독 공정이 처리하던 유출수는 10 mg/L 내외의 SS를 함유하는 것이 일반적이어서, 약품비가 소요되지 않는 자외선(UV) 공정이 다수를 점하고 있다. 그러나, 앞 절에서 언급한 바와 같이 1차 처리된 강우 월류수의 SS 농도는 평균 100-150 mg/L 수준일 것이며 초기에는 200 mg/L 일 가능성도 높아 UV가 효과적으로 조사될 수 있는 조건이 아니다. 한편 염소와 같은 화학적인 방법을 사용할 경우에는 SS가 병원균과 결합되어 화학 소독제와의 접촉을 차폐함을 통해 소독 효율을 감소시킬 가능성이 있다. 따라서, 본 연구

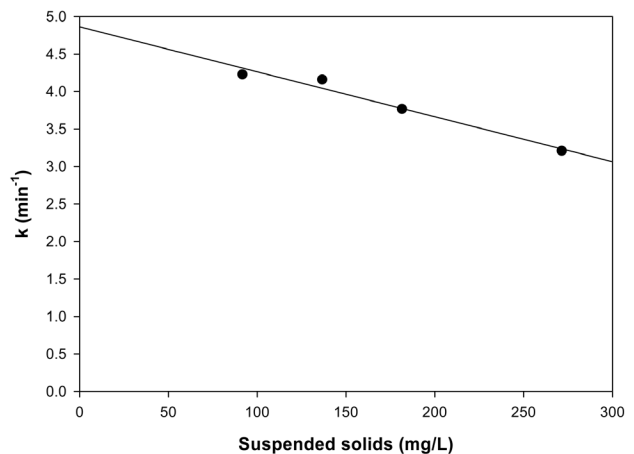


Fig. 6. Effect of SS concentrations on the pseudo-1st order reaction rate for total coliform inactivation.

Table 4. Estimation of the maximum Pseudo-1st order reaction rate constant at NaOCl 0.11-4.00 mg Cl₂/L, pH 6.5-8.0, 15-25°C, SS 91-271 mg/L, and ammonia 11 to 41 mg N/L

Cl ₂ (mg/L)	pH	Temp. (°C)	SS (mg/L)	NH ₄ ⁺ (mg N/L)	Measured <i>k</i> (min ⁻¹)	Estimated <i>k</i> (min ⁻¹)	<i>k</i> ₀ (min ⁻¹)
0.11	7.0	25	98	20	0.5010	0.4737	6.3616
0.57	7.0	25	98	20	1.8718	1.8212	6.1821
1.14	7.0	25	98	20	2.5649	2.7598	5.5901
4.00	7.0	25	110	32	4.2832	4.2884	6.0076
4.00	6.5	20	87	14	5.0405	4.7523	6.3796
4.00	7.0	20	87	14	4.3473	4.4030	5.9387
4.00	7.5	20	87	14	4.1425	4.0794	6.1079
4.00	8.0	20	87	14	4.0206	3.7795	6.3985
4.00	7.0	15	123	10	4.1209	4.1099	6.0310
4.00	7.0	20	123	10	4.2274	4.1599	6.1124
4.00	7.0	25	123	10	4.2832	4.2013	6.1321
4.00	7.0	20	92	11	4.2286	4.3684	5.8223
4.00	7.0	20	92	21	4.2629	4.3684	5.8696
4.00	7.0	20	92	31	4.1721	4.3684	5.7445
4.00	7.0	20	92	41	4.2111	4.3684	5.7982
4.00	7.0	20	91	11	4.2282	4.3753	5.8126
4.00	7.0	20	137	13	4.1616	4.0690	6.1517
4.00	7.0	20	182	15	3.7688	3.7902	5.9809
4.00	7.0	20	271	19	3.2092	3.2936	5.8606
Average							6.0148
Standard deviation							0.2248
R ²							0.9836

에서는 SS 농도에 따른 염소 소독 효율을 실험을 통해 평가하였다. Fig. 6에 도시한 바와 같이 소독 반응 속도는 SS가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였으며, 앞에서 언급한 차폐 현상이 원인으로 판단된다. SS가 반응 속도에 미치는 영향은 지수 함수식 (6)으로 잘 묘사되었다(R²=0.955). 간이 여과 1차 처리의 SS 제거율을 60%로 가정할 때, 소독 공정으로 유입되는 SS는 Table 1에 의거하여 270 mg/L 이하 일 것으로 사료된다. 식 (6)에서 도출된 계수를 적용할 경우, 270 mg/L에서 소독 반응의 일차 반응 상수는 용존 조건에 비해 75% 수준으로 감소하는 것으로 산정된다. 이 정도의 효율 감소는 체류시간 또는 소독 농도의 증가를 통해 극복할 수 있는 수준으로 판단된다.

3.2. 소독 조건 종합 영향 도출

소독 반응 속도 상수(*k*)에 대한 NaOCl 농도, pH, 온도, SS 영향을 모두 포함하는 종합 모델을 식 (8)과 같이 산정하고, 각 상수는 3.1에서 도출된 값을 사용하였다.

$$k = k_0 \left(\frac{C}{K+C} \right) (b^{pH-pK_a}) \left(e^{-\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{293} \right)} \right) (e^{-m(SS)}) \quad (8)$$

여기서, *C*: 소독제 농도(mg Cl₂/L)
T: 온도(K)
SS: 부유물질 농도(mg/L)
*k*₀: 최대 일차 반응 속도 상수(min⁻¹)
K: Cl₂ 농도에 대한 반 속도 상수(1.212 mg Cl₂/L)
b: pH 영향 밀수(0.8584)
pK_a: 차아염소산 해리 상수(7.64 at 15°C, 7.59 at 20°C, 7.53 at 25°C)
E_a: 소독 반응 활성화에너지(2,770 J/mol)
R: 기체 상수, 8.314 J/mol.K
m: SS 영향 계수(0.001577 L/mg)

식 (8)을 3.1의 실험 조건에 대입하여 역산한 결과, Table 4에 도시한 바와 같이 최대 소독 효율(*k*₀)은 6.141 min⁻¹으로 계산되었다. 본 값은 NaOCl 농도 0.11-4.00 mg Cl₂/L, pH 6.5-8.0, 온도 15-25°C, 암모니아 농도 41 mg/L 이하, SS 91-271 mg/L에서 유효하며, 1차 처리된 강우 월류수에 일반적으로 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

일반적으로 소독 반응조는 이상적인 플러그 흐름 반응조(분산수 0.004-0.02)로 설계하므로, 필요한 체류시간은 다음 식 (9)과 같이 처리 효율과 일차 반응 속도의 함수로 나타낼 수 있다.

$$\theta = \frac{\log\left(\frac{N_0}{N}\right)}{k} \quad (9)$$

여기서, θ : 수리학적 체류시간(min)

Kothandaraman⁶⁾에 의하면 강우 월류수의 총 대장균군은 최대 8.6 × 10⁴ MPN/mL이며, Ministry of Environment³⁾에서 입법예고한 간이공공하수처리시설 방류수의 총 대장균군수 기준은 3,000 MPN/mL이다. 따라서, 최악의 월류수 유입 수질을 1 × 10⁵ MPN/mL로 가정하고, 유출 수질을 안전하게 1,000 MPN/mL로 설정하면 필요한 소독 효율은 99% (2-log)이다. 유입 대장균군수와 유사하게 최악의 수질(SS 271 mg/L, 15°C, pH 8.0)을 가정하고, 염소 주입 농도를 1.0 mg/L로 설정할 경우, 이 때의 속도 상수(*k*)는 1.592 min⁻¹으로 계산되며, 필요한 수리학적 체류시간은 1.25분(75초)이 된다. 이는 짧은 체류시간의 염소 소독조 설치를 통해 강우 월류수의 대장균군수 저감이 가능함을 의미한다.

4. 결론

강우 월류수를 대상으로 소독제 농도(0.11-4.0 mg Cl₂/L), pH (6.5-8.0), 온도(15-25°C), 암모니아 농도(10-41 mg/L), 부유물질(91-271 mg SS/L)이 염소 소독 반응 속도에 미치는 영향을 고찰하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 소독제 농도 효과는 saturation-type model로 잘 묘사되었으며, 도출된 반속도 상수는 1.212 mg Cl₂/L였다.
- 2) pH 증가는 소독 반응 속도의 감소로 이어졌으며, 이는 OCl⁻의 낮은 소독효과에 기인한 것으로 사료된다.
- 3) 온도 증가에 따라 소독 반응 속도가 향상되었으며, van't Hoff-Arrhenius식으로 계산된 활성화에너지는 2.77 kJ/mol이었다.
- 4) 암모니아 농도는 소독 반응 속도에 영향을 주지 않았다.
- 5) 소독 반응 속도는 부유물질 농도에 따라 감소하였으며, 270 mg SS/L에서의 일차 반응 상수는 용존 조건의 75% 수준이었다.

Acknowledgement

이 논문은 2012학년도 대구대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

KSEE

Reference

1. Ministry of Environment, Korea, Regulatory Strategy for first flush(2011).
2. Lee, D. I., "Integrated management of urban sewer system under wet-weather conditions, Ph. D dissertation," Hanyang University(2003).
3. Ministry of Environment, Korea, Improvement of combined sewer overflows, 20140217(2014).
4. Brezonik, P. L. and Stadelmann, T. H., "Analysis and predictive models of stormwater runoff volumes, loads, and pollutant concentrations from watersheds in the Twin Cities metropolitan area, Minnesota, USA," *Water Res.*, **36**, 1743~1757(2002).
5. U. S. EPA, Combined sewer overflow technology fact sheet-chlorine disinfection. EPA 832-F-99-034(1999).
6. Kothandaraman, V., "Water quality characteristics of storm sewer discharges and combined sewer overflows," *Circular*, p. 109(1972).
7. U. S. EPA, Microstraining and Disinfection of Combined Sewer Overflows-Phase II. EPA R2-73-124(1973).
8. Lee, J. H. and Bang, K. W., "Characterization of urban stormwater runoff," *Water Res.*, **34**(6), 1773~1780(2000).
9. Kim, K. L., "A study on the development of sewage treatment plant optimal management model by inflow increase during rainfall," Master's thesis, University of Seoul(2008).
10. Li, T., Tan, O. and Zhu, S., "Characteristics of combined sewer overflows in Shanghai and selection of drainage systems," *Water Environ. J.*, **24**, 74~82(2010).
11. Metcalf & Eddy, Inc., Wastewater Engineering(2004).
12. Wilkinson, D. H., Armstrong, D. J. and Blevins, D. W., Effects of wastewater and combined sewer overflows on water quality in the Blue River Basin, Kansas City, Missouri and Kansas, July 1998-October 2000, US Geol. Survey Water Res. Invest. Rept. 02-4107, p. 162(2002).