

# 탈기와 부상 공정에 의한 소독부산물의 제거특성에 관한 비교 연구 Comparative Study on Removal Characteristics of Disinfection By-products by Air Stripping and Flotation Processes

차화정 · 원찬희\* · 이강학\*\* · 오원규\*\*\* · 곽동희\*\*\*,†

Hwa-Jeong Cha · Chan-Hee Won\* · Kang-Hag Lee\*\* · Won-Kyu Oh\*\*\* · Dong-Heui Kwak\*\*\*,†

전주시 맑은물사업본부 · 전북대학교 환경공학과 · \*\*한국수자원공사 · \*\*\*서남대학교 환경화학공학과

Water Work Headquarters, Jeonju City

\*Department of Environmental Engineering, Chonbuk National University

\*\*K-water, Korea Water Resources Corporation

\*\*\*Department of Environmental and Chemical Engineering, Seonam University

(Received July 1, 2016; Revised August 22, 2016; Accepted September 12, 2016)

**Abstract :** It is well known that volatile compounds including disinfection by-products as well as emissive dissolved gas in water can be removed effectively by air stripping. The micro-bubbles of flotation unit are so tiny as microns while the diameter of fine bubbles applied to air stripping is ranged from hundreds to thousands of micrometer. Therefore, the micro-bubbles in flotation can supply very wide specific surface area to transfer volatile matters through gas-liquid boundary. In addition, long emission time also can be gained to emit the volatile compound owing to the slow rise velocity of micro-bubbles in the flotation tank. There was a significant difference of the THMs species removal efficiency between air stripping and flotation experiments in this study. Moreover, the results of comparative experiments on the removal characteristics of THMs between air stripping and flotation revealed that the mass transfer coefficient,  $K_{La}$  showed obvious differences. To overcome the limit of low removal efficiency of dissolved volatile compounds such as THMs in flotation process, the operation range of bubble volume concentration is required to higher than the operation condition of conventional particle separation.

**Key Words :** Air Stripping, Bubble, Disinfection By-Products, Flotation, Trihalomethane

**요약 :** 수중에 용존된 가스뿐 아니라 소독부산물과 같은 휘발성 화합물은 탈기에 의해 효과적으로 제거할 수 있는 것으로 알려져 있다. 탈기공정에 사용되는 미세 기포는 수백~수천  $\mu\text{m}$ 이지만 부상 공정의 기포는 수  $\mu\text{m}$  정도로 작다. 이에 따라 부상 공정에서의 마이크로 기포는 수중의 휘발성 화합물이 대기로 방출될 수 있는 매우 넓은 기-액 비표면적을 제공한다. 또는 마이크로 기포는 상승 속도가 느려서 휘발성 화합물이 방출될 수 있는 긴 체류시간을 갖게 된다. 본 연구에서 일련의 탈기와 부상 실험을 실시한 결과, THMs의 제거율에서 상당히 큰 차이가 있었다. THMs의 물질전달계수  $K_{La}$  역시 큰 차이를 보였다. 따라서 부상공정에서 THMs과 같은 휘발성 화합물을 제거하기 위해서는 일반적으로 입자제거를 위하여 적용되는 통상적인 운전범위보다 더 높은 기포체적농도가 필요함을 알 수 있다.

**주제어 :** 탈기, 기포, 소독부산물, 부상, 트리할로메탄

## 1. 서론

부상분리는 분산매(dispersion medium)중에 함유된 부유상(suspended phase)에 미소한 기포를 부착시켜 분산매와 공기가 접하고 있는 한계면까지 부상시켜 고액분리를 유도하는 단위조작을 칭한다. 특히 저탁도, 부식질 또는 자연적인 색도나 조류 등을 함유한 원수의 처리에 유용한 공정으로 알려져 있다.<sup>1)</sup> 북유럽을 중심으로 널리 적용되고 있는 가압부상법은 국내에서도 정수처리공정에서 부유 고형물을 제거하는 목적으로 침전공정의 효과적인 대안으로 적용되고 있다.<sup>2)</sup> 아울러, 제지 및 식품폐수 등의 생물학적 폐수처리에서뿐 아니라 하수처리공정에서도 플록 입자의 부상분리와 슬러지 농축에 사용되고 있다.<sup>3)</sup> 이와 같이 부상분리의 주요 제거대상은 고형물 입자이며 기름과 유분을 제외하고

는 입자화되지 않은 용존 물질을 처리대상으로 삼는 경우는 매우 드물다.<sup>4)</sup> 입자성 물질이 아닌 냄새 유발물질인 2-MIB와 Geosmin의 제거에도 부상공정이 적용된 바 있으나 활성탄에 흡착시킨 뒤 기포가 활성탄 입자를 부상분리한 방법으로 용존 유기물질을 기포로 직접분리한 것은 아니었다.<sup>5)</sup> 그러나 부상공정이 고형물 입자의 제거공정임에도 불구하고, 부상분리 과정에서 많은 기포가 연속 주입됨으로써 기-액 경계면이 형성되어 수중에 휘발성 유기화합물의 탈기에 의한 제거가 이루어질 수 있다는 가능성을 배제할 수는 없다.

한편, 탈기(air stripping)은 수중에 기포를 공급시켜 물과 공기를 접촉하게 함으로써 물속에 녹아 있는 휘발성 물질이 공기 중으로 휘발되는 물질 고유특성을 이용하여 휘발성 오염 물질을 제거시키는 방법이다. 즉, 탈기 공정은 물속에 녹아 있는 휘발성 물질의 액체상에서 기체상으로 물질이

† Corresponding author E-mail: kwak124@hanmail.net Tel: 063-620-0223 Fax: 063-620-0211

전이되는 과정이다. 탈기 기법의 효율을 파악하는데 중요한 지표의 하나는 헨리상수이다. 헨리상수는 물질의 종류에 따라 다른데, 헨리의 상수가 높은 물질이 쉽게 액체에서 기체로 휘발될 수 있다. 일반적으로 헨리상수가 0.01 m<sup>3</sup>/mol 이상인 유기 물질이 탈기에 의하여 성공적 처리가 가능하다.

먹는 물에서는 상수 원수에서 유래되는 천연유기물질(natural organic matters, NOMs)과 이취미 화합물뿐만 아니라 정수처리과정에서 발생하는 소독부산물(disinfection by-products, DBPs) 등 다양한 용존성 유기화합물이 존재하며, 소독부산물과 같은 휘발성 유기화합물(volatile organic compounds, VOCs)은 인체의 건강에 바람직하지 않으며 최대한 제거하는 것이 좋다.<sup>6-8)</sup> 특히, 전구물질(precursor)을 함유하는 상수도시설에서 트리할로메탄(trihalomethane, THMs) 등의 소독부산물은 여러 정수처리 공정에서 발생하게 되는데, 취수장이나 착수정에서의 전염소처리(pre-chlorination) 및 침전지 등 정수처리공정에서 실시되는 중간염소처리에 의해서도 발생하며 살균소독을 목적으로 한 정수처리의 최종 단계인 후염소처리(post-chlorination)에서 다량 생성된다.<sup>9-11)</sup> 소독부산물은 정수처리후 송·배수 과정이나 가정에서 부가적인 탈기를 통하여 상당부분 제거가 가능할 것이다.<sup>12)</sup> 다음의 Table 1은 THMs의 물리적 특성을 나타냈다. THMs에서는 25℃에서 클로로포름(CHCl<sub>3</sub>)이 0.143으로 헨리상수가 가장 크고 브로모포름(CHBr<sub>3</sub>)이 0.022로 가장 작다. 헨리상수가 클수록 휘발성이 크다.

본 연구에서는 시중에서 판매되고 있는 포기장치와 용존 공기부상 공정에서 주입되는 기포를 이용하여 소독부산물을 처리하고 그 제거특성을 탈기공정과 비교하여 살펴보았다. 탈기공정에서 사용되는 기포는 기포직경이 수백~수천 마이크로미터인 대형 기포인 반면, 부상공정에서 적용되는 기포는 수~수십 마이크로미터의 매우 작은 기포이다. 그러므로 탈기공정에 비하여 부상공정은 넓은 기-액 경계면을 가지는 장점이 있다. 또한, 미세기포의 상승속도도 느려서 부상공정에서 수중에 용존된 휘발성 유기화합물의 탈기에 충분한 시간이 확보된다. 궁극적으로는 본 연구를 통하여 수돗물을 포함하여 하수처리장 방류수나 수영용수 등에 과

다하게 포함된 소독부산물의 제거에 간단한 포기장치나 부상분리장치의 적용 타당성을 평가하기 위한 기초자료를 제공하고자 하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 물질전달계수의 평가

물질이 기-액 경계면을 통하여 확산되는 속도는 물질의 분자크기와 형태 및 농도구배(concentration gradient)에 따라 달라지며, 액체막을 통한 휘발성 화합물의 물질전달속도는 Fick's law로부터 얻어진다. 이 때 단위시간당 VOCs 농도변화를 기초로, 초기조건 t=0, C=C<sub>0</sub> 조건에서 총괄 물질전달계수 K<sub>L</sub>a는 다음 Eq.1과 같이 표현할 수 있다.

$$\ln(C_L - C_{gt}) = -K_{La} \cdot t + \ln(C_L - C_{g0}) \quad (1)$$

여기서 공기 중에 존재하는 VOCs의 C<sub>g0</sub>는 무시할 수 있는 정도로 작고,<sup>16)</sup> C<sub>gt</sub>는 물에서 제거된 농도와 같다. VOCs의 물질전달에 관해 탈기공정에서 사용되는 단순 모델은 다음(2)와 같다.<sup>17)</sup> 이 (K<sub>L</sub>a)<sub>VOCs</sub>는 하수뿐만 아니라 수돗물의 VOCs 농도와 처리에서도 중요하다.<sup>18)</sup>

$$r_{VOCs} = -(K_{La})_{VOCs} (C_L - C_s) \quad (2)$$

여기서, r<sub>voc</sub>: VOCs 전달속도 (μ/m<sup>3</sup> · h)  
(K<sub>L</sub>a)<sub>voc</sub>: 총괄 VOCs 전달계수 (L/h)

본 연구에서는 위에 나타낸 (1)에 의거하여 시간에 따라 변화하는 THMs 농도를 측정하여 물질전달 계수를 평가하였다.

### 2.2. 실험장치 및 운전방법

탈기와 부상분리 실험을 위하여 bench scale의 pilot plant를 제작하여 실험을 실시하였다. 탈기를 위한 장치로는 di

Table 1. Physical properties of THMs

Compounds	Chloroform	Bromodichloro-methane	Dibromochloro-methane	Bromoform
Formula	CHCl <sub>3</sub>	CHBrCl <sub>2</sub>	CHBr <sub>2</sub> Cl	CHBr <sub>3</sub>
Molecular weight	119.38	163.8	208.3	252.77
Melting point	-64℃	-55℃	less than -20℃	0.86℃
Boiling point	62℃	90℃	116~122℃	149℃
Specific gravity <sup>a)</sup>	1.289	1.971	2.28	2.89
Solubility	8,000 mg/L @20℃	-	-	3,190 mg/L @30℃
Henry constant <sup>b)</sup> (m <sup>3</sup> atm/mol)	exp(11.9-5,200/T)	exp(11.3-5,210/T)	exp(10.7-5,210/T)	exp(11.6-5,670/T)
Experimental Henry's law constant (25℃)	1.72 × 10 <sup>-13</sup>	9.04 × 10 <sup>-2 14</sup>	4.83 × 10 <sup>-2 13</sup>	2.19 × 10 <sup>-2 15</sup>
Diffusivity at 20℃	3.42 × 10 <sup>-5</sup> (ft <sup>2</sup> /h)	3.36 × 10 <sup>-5</sup> (ft <sup>2</sup> /h)	3.31 × 10 <sup>-5</sup> (ft <sup>2</sup> /h)	3.27 × 10 <sup>-5</sup> (ft <sup>2</sup> /h)

<sup>a)</sup> referred to water at 20℃, <sup>b)</sup> T in absolute temperature (K)

**Table 2.** Dimension of bench scale plant and equipments

Compressor	Mass flow controller	Saturator	Air stripping and flotation column
• Inflow air 111 L/min	• Max pressure 9.9 kg/cm <sup>2</sup>	• Diameter 148 mm	• Diameter 100 mm
• Outflow air 60 L/min	• Control range 0~10 kg/cm <sup>2</sup>	• Height 430 mm	• Height 1,000 mm
• 8 bar (116 psi), 1,700 rpm	• Air flow rate 0~10 L/min	• Total volume 7.40 L	• Total volume 7.85 L (Effec. volume 6.28 L)

ffused aeration column을 설치하고 부상은 용존공기부상 방식의 장치를 사용하였다. 실험장치의 제원은 다음의 Table 2와 같으며, 처리공정의 모식도는 Fig. 1에 나타내었다.

실험장치의 운전은 별도의 응집조작 없이 인위적으로 조제된 시료에 기포기(aerator, air pump 220 V, 60 Hz, 3 W, 2.5 L/min) 또는 용존기포 공급장치(dissolved air bubble supplier)를 이용하여 각 조건에 따라 기포 공급유량을 조절하여 실험을 실시하였다. 탈기 실험은 대기압에서 기포기를 가동하여 실험하였고, 부상 실험은 공기포화장치(saturator)를 4-6 atm으로 운전하여 발생하는 미세 기포를 주입하였다.

본 연구의 부상 실험장치에서 주입되는 미세기포의 입경 분포는 다음의 Fig. 2(a)와 같다. 이 장치의 기포입경 분포

**Table 3.** Bubble size distribution of diffused air stripper and dissolved air flotation equipments

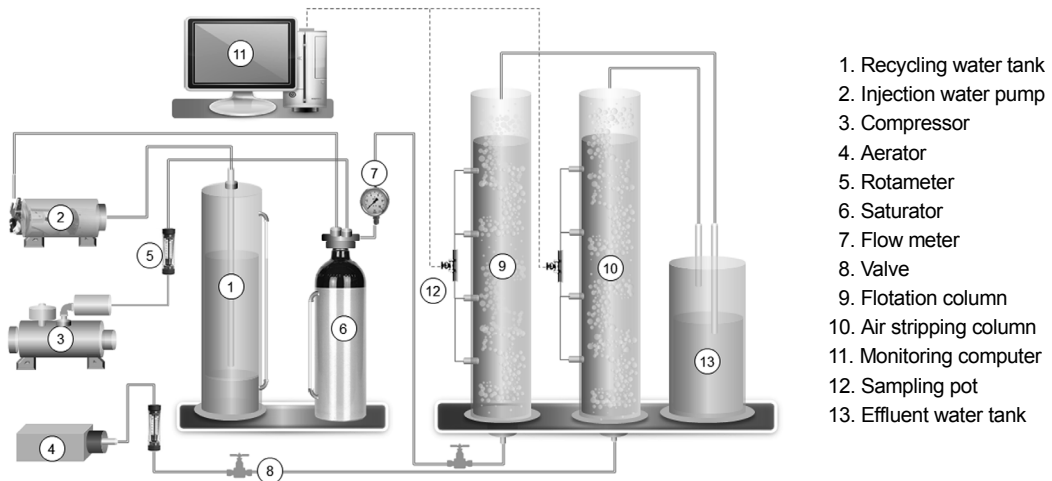
Equipments	Statistical bubble diameter distribution (μm)			
	D <sub>10</sub>	D <sub>50</sub>	D <sub>80</sub>	D <sub>90</sub>
Dissolved air flotation	9.7	37.0	54.5	64.7
Diffused air stripper	411.9	808.5	1,987.7	4,419.6

D number = bubble diameter of percent point in the size distribution

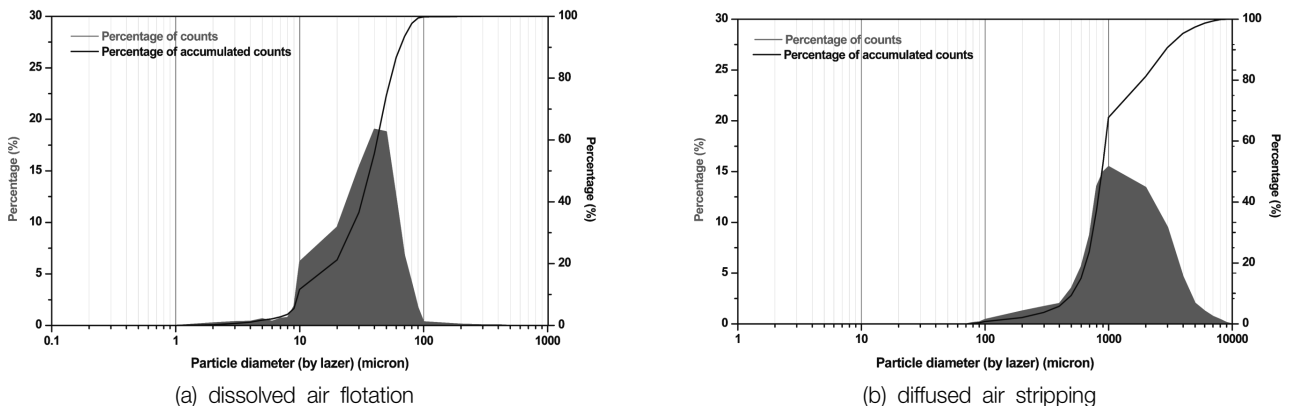
는 기존 측정된 자료를<sup>19)</sup> 이용하였다. 탈기 실험장치에서 주입된 기포의 크기분포는 본 연구에서 측정하여 Fig. 2(b)에 나타내었다. 기포 크기의 측정은 입자분석기(Ankersmid Co., 네덜란드, Model: Eye Tech)를 이용하여 실시하고 기포의 입경 분포를 분석하였다. 입자분석기의 분석 대상구간은 1 초 동안으로 수회 반복하여 측정하였다. 기포의 유효입경 측정범위를 벗어난 대형 기포는 정확한 크기 측정이 어려우므로, 별도로 부상컬럼에서 육안 측정을 실시하여 조정을 한 뒤 Table 3에 기포의 입경분포를 통계적으로 나타내었다.

**2.3. 시료 및 소독부산물의 분석방법**

시료는 G 광역상수도에서 생산되는 수돗물을 이용하였다.



**Fig. 1.** Schematic diagram of diffused air stripper and dissolved air flotation system.



**Fig. 2.** Bubble diameter distribution in flotation column,

Table 4. Distribution of THMs concentration in G WTP

Description	Typical trihalomethane concentration (mg/L)				
	2011	2012	2013	2014	2015
Average	0,034	0,032	0,029	0,026	0,032
Min.	0,012	0,018	0,019	0,018	0,010
Max.	0,045	0,045	0,055	0,041	0,067

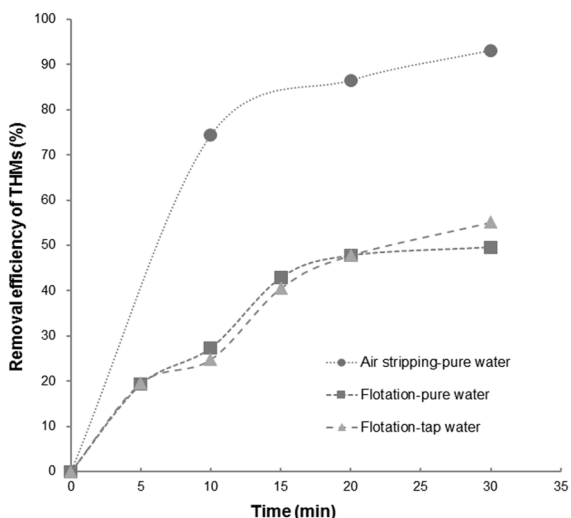
이 수돗물의 통계학적 THMs 농도는 다음의 Table 4에 나타났다. 증류수 또는 수돗물에 일정 농도가 되도록 클로로포름( $\text{CHCl}_3$ ), 브로모디클로로메탄( $\text{CHBrCl}_2$ ), 디브로모클로로메탄( $\text{CHBr}_2\text{Cl}$ ), 그리고 브로로포름( $\text{CHBr}_3$ )을 spiking하여 실험 원수로 사용하였다. 모든 시료는 60 mL 갈색병에 시료를 채수하였고, 수돗물 시료는 잔류염소에 의한 영향과 실험오차를 줄이기 위하여  $\text{NH}_4\text{Cl}$ 를 첨가하여 잔류염소를 제거하였다.

시료에 함유된 THMs의 분석은 40 mL-vial에 헤드 스페이스가 발생되지 않도록 poly-tetra-fluor-ethylene 마개를 사용하여 시료를 장치에 주입하여 분석하였다. GC/MS의 조건은 질량범위 40-200 m/z scan mode로 질량스펙트럼을 확인하고 SIM (Selected Ion Monitoring) mode로 정량하였다. THMs의 전처리는 Tekmar STRATUM Aquatek 70 concentrator purge & trap을 사용하였고, 분석기기는 Agilent 5975C Gas Chromatograph, 검출기는 Agilent 7890A Mass selective detector를 사용하였다. THMs의 분석방법과 분석조건은 EPA method 552.2에 따라 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. THMs의 제거효율

탈기와 부상분리의 운전시간에 따라 THMs의 제거효율을 살펴보았다. 탈기 컬럼의 운전조건으로 공기공급율(air



(a) Three types of experiments

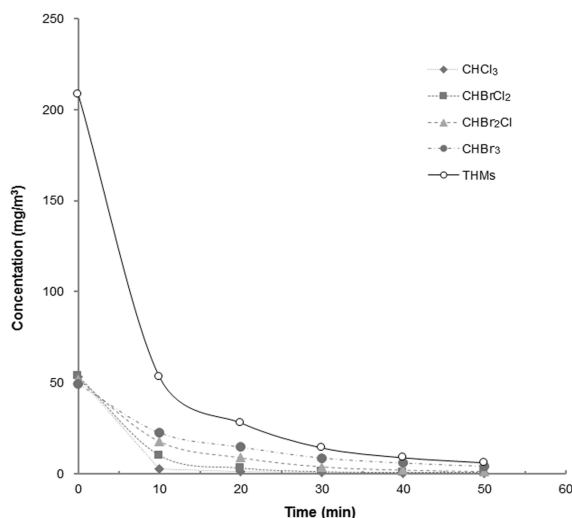
Fig. 3. Removal efficiency of THMs in terms of operation time.

supply rate)은 1,067 mL/min이며, 수온은 18.5°C이었다. 부상 컬럼의 운전은 saturator 4.5 atm에서 순환율 10%를 실시하여 기포의 배출공기량(emissive air volume) 11.5 mL/L, /min, 수온 18.5°C, 기포구름(bubble cloud)의 평균 상승속도(rise velocity) 0.5~0.75 m/min로 운전되었다. 유입수의 THMs 농도는 증류수를 이용하여 먹는물 수질기준 0.1 mg/L를 상회하는 농도범위(탈기 0.285 mg/L, 부상 0.215 mg/L)로 실시하였으며 수돗물을 이용한 부상실험은 0.598 mg/L의 농도에서 실시되었다.

실험결과는 Fig. 3(a)에 나타난 바와 같이 시간에 따라 THMs의 제거율이 탈기와 부상 공정에서 다소 큰 차이를 보였다. 탈기 공정에서는 10분 정도로 비교적 짧은 탈기시간으로도 70% 이상의 제거율을 나타낸 반면 부상공정에서는 30분의 처리시간 동안 약 50%의 제거효율에 그쳤다. 증류수와 수돗물에서도 비슷한 제거율을 나타내었다. 탈기공정에서 운전시간에 따른 THMs의 세부 항목별로 농도변화를 살펴보면, Fig. 3(b)와 같이 클로로포름( $\text{CHCl}_3$ )의 제거속도가 가장 빨랐고 다음으로 브로모디클로로메탄( $\text{CHBrCl}_2$ ), 디브로모클로로메탄( $\text{CHBr}_2\text{Cl}$ ), 그리고 브로로포름( $\text{CHBr}_3$ ) 순이었다.

#### 3.2. 세부 항목별 제거특성 비교

탈기와 부상공정에서 THMs를 구성하는 세부 항목별로 변화되는 양상을 비교하였다. 탈기공정에서는 다음의 Fig. 4(a)에 나타난 바와 같이 세부 항목별로 시간에 따라 큰 차이를 나타내었으나, 부상공정에서는 세부항목별로 다소 유사한 변화추이를 나타내었다(Fig. 4(b)). 세부 항목별로 살펴보면, 헨리 상수값(Table 1)이 클수록 탈기와 부상에 의하여 제거되는 양도 큰 것으로 나타났다. 따라서 탈기공정과 부상공정에서 나타나는 THMs 항목별 제거특성과 차이를 살펴보기 위하여, 물질전달계수를 산정하고 주입되는 기포 표면적과 주입량에 따른 제거정도를 상호 비교하여 살펴보았다.



(b) Four types of THMs species for air stripping

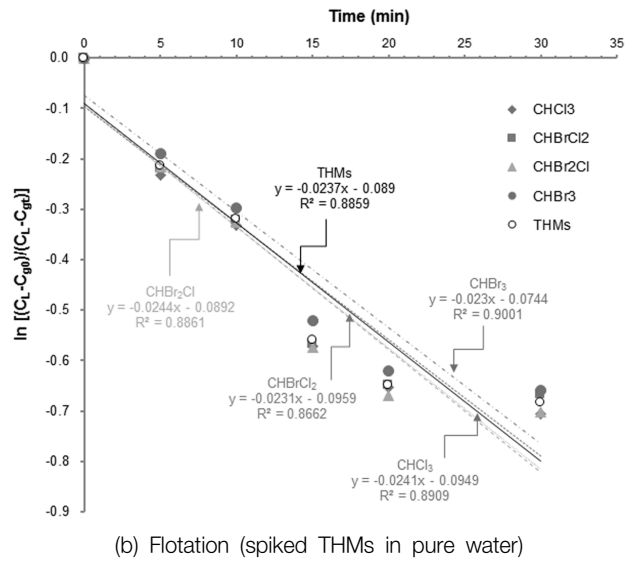
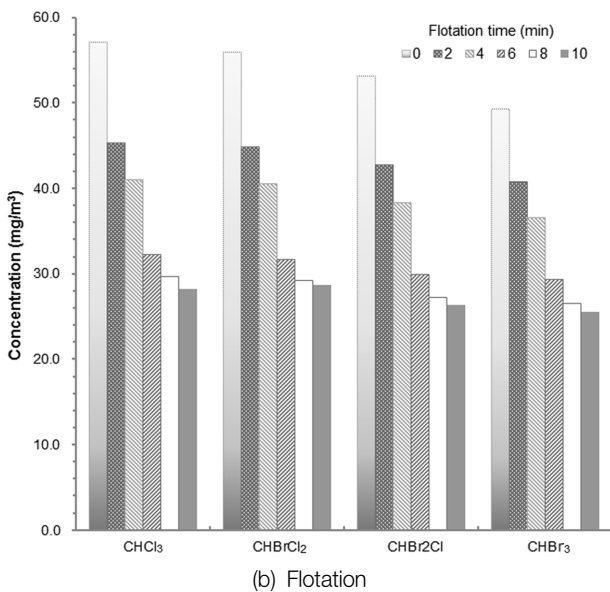
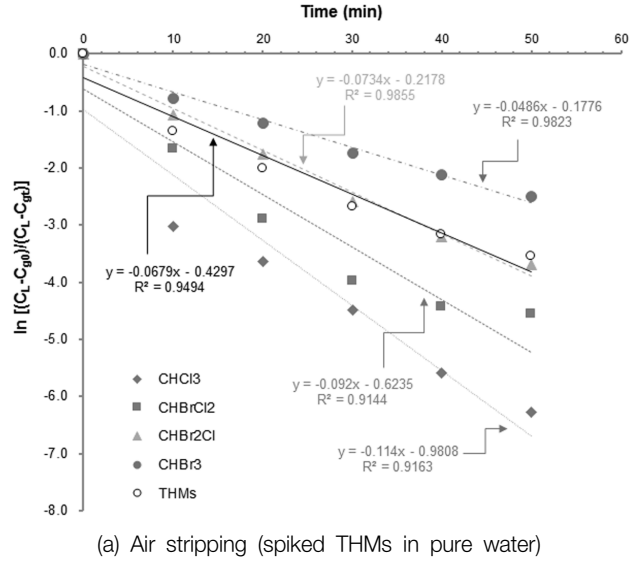
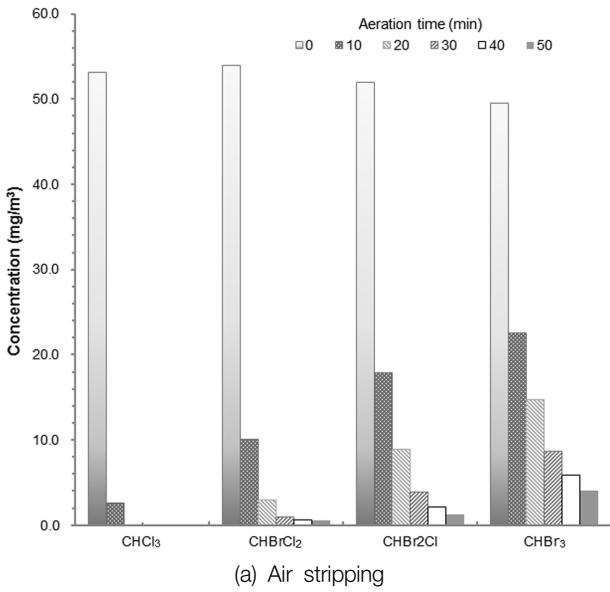


Fig. 4. Comparison of concentration change for four types of THMs species.

### 3.3 물질전달 계수(mass transfer coefficients)

Diffused aeration system을 이용한 탈기공정과 dissolved air flotation 공정에서 THMs의 물질전달계수(mass transfer coefficients,  $K_L a$ )를 평가하였다. 다음의 Fig. 5(a)와 (b)에 나타난 바와 같이  $K_L a$  값은 탈기공정과 부상공정이 큰 차이를 보였다. 반면, 증류수와 수돗물에서는 큰 차이를 나타내지 않았다(Fig. 5(b)와 (c)). 탈기공정의  $K_L a$ 는 0.0679/ min이었으며, 부상공정의  $K_L a$  값은 증류수에서 0.0231 /min, 수돗물에서 0.0271 /min으로 평가되었다. 이렇게 공정별로  $K_L a$  값이 큰 차이를 유발하는 조건으로는 탈기공정에 주입되는 평균 기포 입경은 808.5  $\mu\text{m}$ 로 큰 반면 부상공정에서는 평균 기포입경이 37.0  $\mu\text{m}$ 로 작은 미세 기포(micro-bubble)가 주입된 차이가 영향을 미친 것으로 유추되어진다.

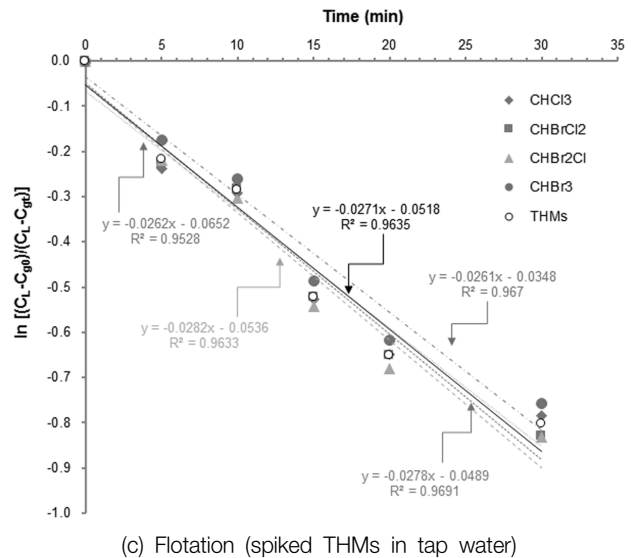


Fig. 5. Comparison of concentration change for four types of THMs species.

미세 기포는 대형 기포에 비하여 비표면적이 넓고 상승속도가 느려서 휘발성 화합물의 상 이동(phase transfer)에 필요한 넓은 기-액 경계면을 가진다. 그러므로 상대적으로 긴 기-액 반응시간을 갖게 되어 휘발성 화합물의 배출(emission)에 장점이 있다. 그러나 THMs와 같은 휘발성 화합물의 제거에 부상공정이 유리한 조건을 가짐에도 불구하고 실제 실험에서 THMs의 낮은  $K_{La}$ 값을 나타내었으며, 이에 대한 원인 고찰과 실험 분석이 요구된다.

### 3.4. 기-액 경계면 및 공기주입량에 따른 비교

탈기 공정과 부상 공정의 물질전달계수,  $K_{La}$ 값이 큰 차이를 나타내는 원인을 추적하고자 실험에 적용된 대형기포와 미세기포의 비표면적과 공기주입량의 관점에서 THMs의 처리효율을 살펴보았다. 액체중의 휘발성 물질을 대기중

으로 방출시키기 위해서는 대형 기포보다는 미세 기포가 유리한 점이 많다. 그러나 이와 다른 실험결과를 나타내는 원인으로, 1) 미세 기포의 기-액 경계면에서의 물질이동 저항이 크거나, 2) 부상 공정에서 주입되는 절대 공기량이 탈기 공정에 비하여 소량으로 주입되어 운전되는 것이다.

탈기 및 부상 실험에서 주입된 기포 공급량과 Fig. 2의 기포인정 측정결과를 토대로 기포의 비표면적을 산정하였다. 다음의 Fig. 6에는 운전시간 동안 컬럼에 주입된 기포의 비표면적당 물에서 대기중으로 방출된 THMs 제거량을 나타내고 있다. 탈기 공정에서 THMs의 제거량은  $6.32\sim 24.26 \mu\text{g}/\text{m}^2\text{-air}$ 를 보였으며 부상공정에서는  $352.1\sim 823.7 \mu\text{g}/\text{m}^2\text{-air}$ 를 나타내었다. 기포의 비표면적당 제거되는 THMs는 부상공정에서 훨씬 큰 값을 보였다. 또한 운전시간 동안 컬럼에 주입된 기포의 체적당 제거된 THMs는 다음의 Fig. 7에 나

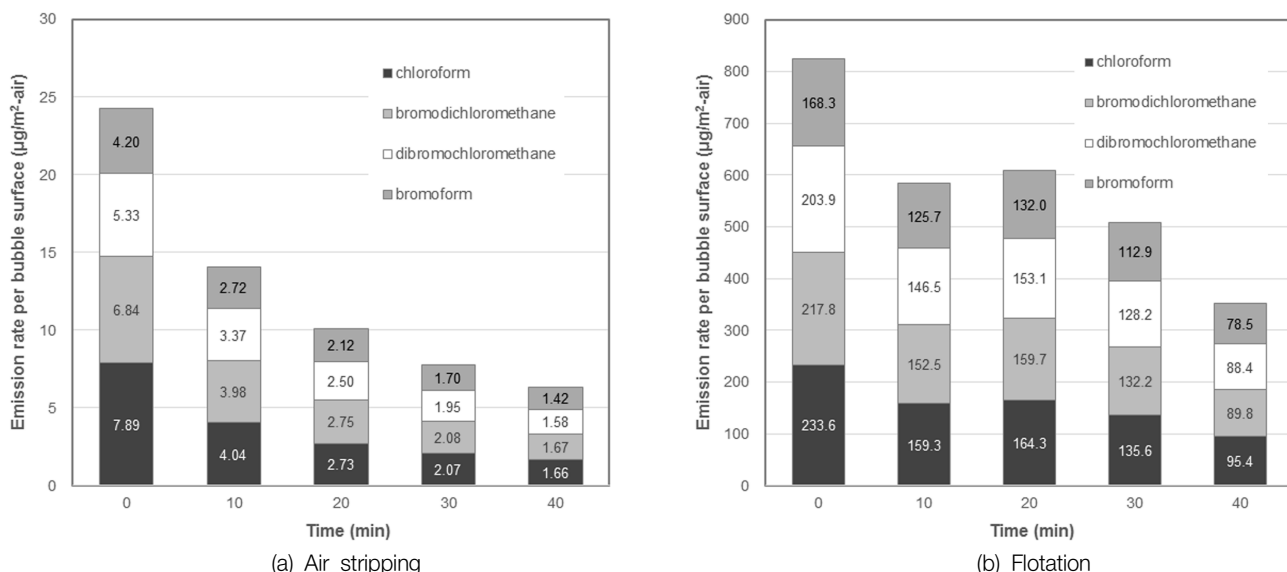


Fig. 6. Comparison of emission rate of THMs species in terms of bubble surface area.

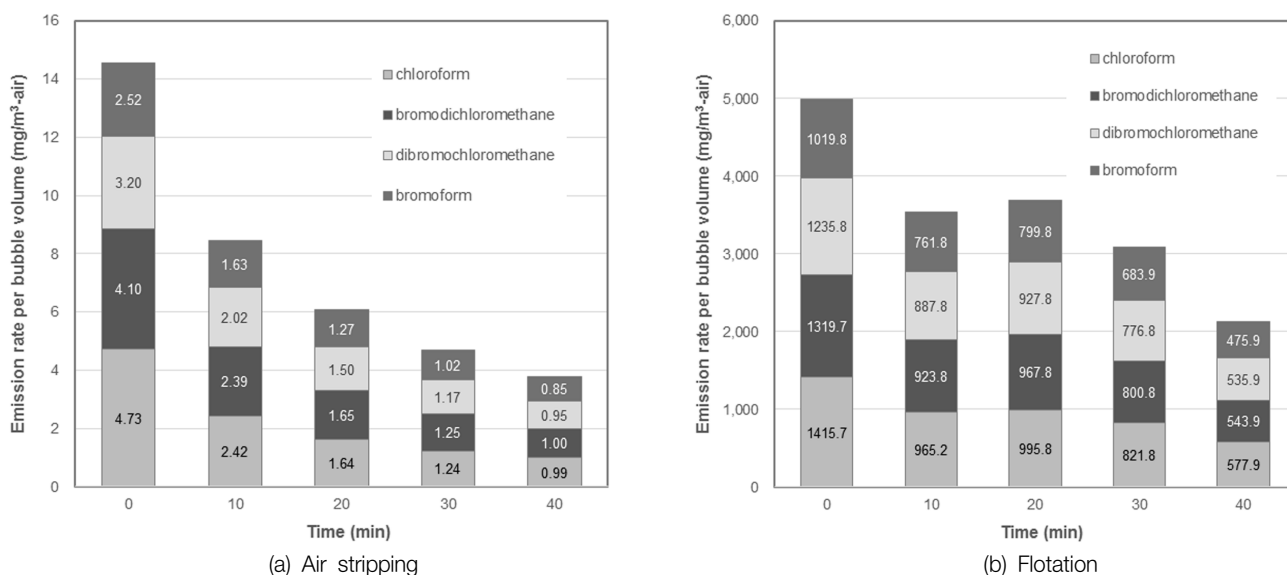


Fig. 7. Comparison of emission rate of THMs species in terms of bubble volume.

타내었다. 탈기 공정에서 THMs의 제거량은 공기주입량당 3.79~14.55 mg/m<sup>3</sup>-air이었으며 부상공정에서는 2,134~4,991 mg/m<sup>3</sup>-air를 나타내었다. 비표면적당 THMs 제거량과 마찬가지로 공기주입량당 제거된 THMs량은 부상공정에서 훨씬 큰 값을 나타내고 있다.

전형적인 부상공정에서 휘발성 유기화합물의 제거율은 높지 않은 것으로 알려져 있다. 부상공정에서 THMs과 같은 소독부산물의 제거율을 향상시키기 위해서, 통상적으로 고행물 제거를 위하여 적용되는 기포체적농도를 보다 높게 운전할 필요가 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결론

대표적인 소독부산물인 THMs와 같은 휘발성 유기화합물에 대한 탈기공정과 부상공정의 제거특성을 비교 연구하기 위하여 일련의 실험을 실시하여 그 결과를 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 물에 용존된 휘발성 유기화합물의 대기 방출은 헨리 상수에 기초하는 것으로 알려져 있는 바와 같이, 탈기 공정과 부상공정에서 모두 클로로포름(CHCl<sub>3</sub>)의 제거속도가 빨랐고 다음으로 브로모디클로로메탄(CHBrCl<sub>2</sub>), 디브로모클로로메탄(CHBr<sub>2</sub>Cl), 그리고 브로로포름(CHBr<sub>3</sub>) 순으로 나타났다.

2) THMs의 물질전달계수, K<sub>L</sub>a는 탈기공정에서 0.0679 /min이었으며, 부상공정에서는 0.0271 /min으로 나타나 탈기공정과 부상공정이 큰 차이를 보였다. 한편, 증류수와 수돗물에서는 각각 0.0231 /min, 0.0271 /min이었으며 큰 차이를 나타내지 않았다.

3) 탈기공정의 THMs 제거량은 기포 비표면적당 6.32~24.26 μg/m<sup>2</sup>-air, 공기 주입량당 3.79~14.55 mg/m<sup>3</sup>-air이었다. 부상공정의 THMs 제거량은 기포 비표면적당 352.1~823.7 μg/m<sup>2</sup>-air, 공기 주입량당 2,134~4,991 mg/m<sup>3</sup>-air를 나타내었다. 기포의 비표면적 및 공기 주입량당 제거되는 THMs는 부상공정에서 모두 훨씬 큰 값을 보였다.

이상과 같은 실험결과를 토대로, 부상공정에서 기포체적농도를 전형적인 운전범위보다 높게 운전한다면 THMs과 같은 소독부산물의 제거율을 보다 향상시킬 수 있을 것으로 여겨진다.

#### Acknowledgement

이 논문은 2015년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(NRF-2015R1D1A3A03020597)입니다.

KSEE

#### References

- Zabel, T., "The advantages of dissolved-air flotation for water treatment," *J. Am. Water Works Assoc.*, **77**(5), 42~45 (1985).
- Kwak, D. H., Jung, H. J., Kim, S. J., Won, C. H. and Lee, J. W., "Separation Characteristics of Inorganic Particles from Rainfalls in Dissolved Air Flotation: A Korean Perspective," *Sep. Sci. Technol.*, **40**, 3001~3016(2005).
- Kwak, D. H., Kim, S. J. and Lim, Y. H., "Flotation separation of biological floc using the dissolved air flotation process," *J. Korean Soc. Water and Wastewater*, **18**(5), 649~655(2004).
- Kim, M. J. and Jun, S. J., "Removal rates of VOCs (volatile organic compounds) for treatment condition using DAF (dissolved air flotation) in water treatment," *J. Korean Soc. Water and Wastewater*, **13**(3), 91~100(1999).
- Kwak, D. H., Yoo, S. J., Lee, E. J. and Lee, J. W., "Evaluation on simultaneous removal of particles and off-flavors using population balance for application of powdered activated carbon in dissolved air flotation process," *Water Sci. Technol. - WST*, **61**(2), 323~330(2010).
- Lee, J. G., Lee, S. M. and Yoon, Y. Y., "Concentration Distribution of VOCs in the Kangnung City Drinking Water System," *J. Korean Soc. Water Environ.*, **12**(3), 237~243(1996).
- Kim, S. J., Kim, J. M., Jeon, Y. T., Park, J. E. and Won, C. H., "The Characteristics of Disinfection by-products Occurrence and Speciation in D Water Treatment Processes," *J. Korean Soc. Water Environ.*, **26**(3), 406~412(2010).
- Lee, Y. H., Park, J. H., Kim, H. K., Ahn, K. H., Kim, T. S., Kim, D. H. and Kwon, D. S., "Characteristics of Chlorination Byproducts and Aldehyde Occurrence in Bottled Tap Water," *J. Korean Soc. Water Environ.*, **28**(5), 7548~761(2012).
- Yeom, C. M., Byun, S. J., Cho, S. H. and Yoon, J. Y., "Disinfection by-products (DBPs) formation potential as the characteristics of natural organic matter (NOM) in raw water," *J. Korean Soc. Water and Wastewater*, **17**(1), 72~78(2003).
- Lee, D., Min, B. S., Park, S. G., Kim, J. and Lyu, J., "Formation Characteristics of DBPs by Chlorination in Water Treatment Plant," *J. Korean Soc. Water Environ.*, **20**(1), 55~62(2004).
- Kim, J. S., Choi, Y. W. and Chung, Y., "DBPs Variation by Chlorination and Preozonation in Drinking Water," *J. Korean Soc. Water Environ.*, **21**(6), 678~681(2005).
- Verma, M. K. and Tyagi, R. K., "Aeration of volatile organic compounds using gas dispersion impellers," *J. Mechanical Eng. Res.*, **4**(7), 213~224(2012).
- Hand, D. W., Hokanson, D. R. and Crittenden, J. C., Air Stripping and Aeration, In: R. D. Letterman, Tech. Ed., Water Quality and Treatment, a Handbook of Community Water Supplies, American Water Works Association, Ch. 5, 5th Edition, McGraw-Hill, Inc., New York(1999).
- Warner, H. P., Cohen, J. M. and Ireland, J. C., Determination of Henry's law constants of selected priority pollutants, EPA/600/D-87/229; NTIS PB87-212684(1987).

15. Munz, C. and Roberts, P. V., "Air-water phase equilibria of volatile organic solutes," *J. Am. Water Works Assoc.*, **79**, 62~69(1987).
16. Chu-Chin, H., Kyoung, H., Stenstrom, S. R. and Michael, K., "Estimating emissions of 20 VOCs (diffused aeration and surface aeration)," *J. Environ. Eng.*, **1**, 119~126(1993).
17. Robert, P. V., Munz, C., Dandliker, P. G. and Matter-Muller, C., Volatilization of organic pollutants in wastewater treatment-model studies, EPA-600/S2-84-047(1984).
18. Bielefeldt, A. R. and Stensel, H. D., "Treating VOC-contaminated gases in activated sludge: mechanistic model to evaluate design and performance," *Environ. Sci. Technol.*, **33** (18), 3234~3240(1999).
19. Kwak, D. H. and Kim, M. S., "Feasibility of carbon dioxide bubbles as a collector in flotation process for water treatment," *J. Water Supply: Res. Technol.-AQUA*, **62**(1), 52~65(2013).