

오존 용해효율 향상을 위한 미세기포 특성 연구

김진훈* · 박종호***

A Study on the Microbubble Characteristics of Ozone to Improve Dissolution Efficiency

Jin-Hoon Kim*, Jong-Ho Park***

Key Words : Ozone(오존), Microbubble(미세기포), Sidestream(사이드스트림) static-mixer(정적혼합기)

ABSTRACT

Ozone is a strong oxidant and a powerful disinfectant. In general, it has been used in drinking water treatment during last 100years. Ozone dissolution features are defined by the two categories of ozone contactors, bubble-diffuser and sidestream ozone contactor. Currently, sidestream-injection systems are gaining in popularity but operating cost might be slightly higher. Sidestream ozone system dissolve ozone into a sidestream flow via an injection setup or in the main process flow stream in some sidestream arrangements. The sidestream flow is subsequently mixed with the main process flow stream, which is directed to a reaction tank or pipeline for oxidation and disinfection reactions. The purpose of this study is to suggest optimal operating pressure, to figure out the static-mixer effect and to understand the microbubble characteristics of ozone to improve dissolution efficiency.

1. 서론

상수도 원수가 오염되지 않았을 때에는 원수를 정수처리 없이 직접 마시거나 응집침전, 여과, 소독과정을 거치는 표준정수처리방법 만으로도 사람이 마시고 사용하는데 아무런 문제가 되지 않았다. 그러나 산업화·도시화가 진행함에 따라 미량유해화학물질의 종류가 다양해지고 수질오염도 점차 심화되고 있는 실정이며, 일부 화학물질은 자연수계에서 미생물 및 기타의 물리화학적 과정을 거치면서 자연분해 되지만 일부 화학물질은 생물학적으로 분해 불가능하여 자연 상태에서 전혀 분해되지 않고 배출되고 있다. 이러한 이유로 안전하고 맛있는 수돗물을 공급하는 것이 곤란하게 되었으며 대책으로 고도정수처리시설을 도입하게 되었다.

기존의 정수처리방법으로 처리가 곤란한 이취미물질, 트리

할로메탈 생성능(THMFP), 색도, 암모니아성 질소, 음이온 계면활성제 등의 처리를 목적으로 시설하는 오존처리, 활성탄처리 등을 고도정수처리라고 하며 효과는 수중의 각종 미생물, 세균 살균과 염소로 완전히 살균되지 않는 바이러스의 불활성화, 용존성 철 및 망간을 제거하고 이취미성분의 탈취 및 물맛을 개선하여 고급화된 수돗물 공급을 가능하게 한다.

오존처리는 오존의 강력한 산화력을 이용하여 분해·제거하거나, 원수 중에 있는 미량유기물질의 성상을 변화시킨 후 활성탄에 흡착시켜 제거하는 방법으로 활용할 수 있으며, 트리할로메탄 전구물질이나 맛·냄새물질의 제거에 효과적이다. 또한 오존은 살균효과가 우수하여 소량의 접촉에 의해서도 대부분의 세균을 사멸시키며, 염소 살균과는 다르게 트리할로메탄 등의 유기염소계 화합물을 생성시키지 않아 이산화염소와 함께 대체 살균제로 사용할 수 있다.

오존 접촉설비는 크게 산기관식과 사이드스트림(side stream) 또는 풀스트림(full stream)방식으로 구분할 수 있으며 최근에 오존설비를 도입하는 경우에는 대부분 스트림(stream)방식을

* 한국수자원공사

** 충남대학교 기계공학부

† 교신저자, E-mail : jhpark@cnu.ac.kr

설치하고 있으나 실증플랜트에서 사이드스트립 방식의 주요 구성품인 인젝터(injector), 정적믹서(static mixer), 노즐(nozzle) 등이 오존 소독능에 미치는 영향에 관한 연구 자료가 부족한 실정이다. 본 연구는 사이드스트립 배관에 흐르는 원수 압력, 수량 변화에 따른 기포 크기 변화, UV₂₅₄ 흡광도, 잔류오존 농도, 기포개수 등의 상관관계를 고찰하였고 정적믹서가 오존가스의 기포 크기, 개수 및 소독효과에 미치는 영향을 고찰하였다.

2. 연구설비 및 시스템

본 연구는 Fig. 1에서와 같이 1,000m³/일 규모의 정수장 실증플랜트에서 실시하였고 5m 높이의 물탱크로부터 오존 접촉조로 자연유하 유입되는 주배관에서 분기된 배관에 Fig. 2와 같이 인젝터, 정적믹서, 노즐 순으로 배열한다. 사이드스트립 배관 내에서 고농도 오존수로 만들어진 혼합수는 다시 주배관에 합류되고 오존 접촉조로 유입되어 일정 체류시간 동안 수중에서 이물질과 반응하게 된다.

사이드스트립 배관의 기액비(G/L)비는 처리대상 원수의 주배관에 비하여 높고 배관 내에서 오존산화가 일어난다. 사이드스트립 배관에 설치된 정적믹서의 유무에 따른 효과를 확인하기 위하여 UV₂₅₄ 흡광도, 기포 개수, 잔류오존 및 기포크기 등에 대하여 고찰하였으며 압력과 유량을 변경하면서 측정하였다.

시료는 정적믹서 전·후단, 노즐 후단, 접촉조에서 채취하



Fig. 1 Water treatment R&D center view

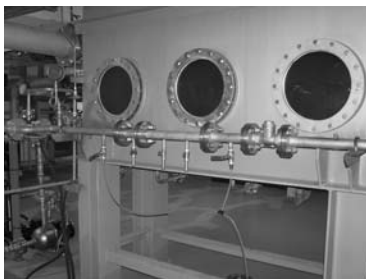


Fig. 2 Side stream ozone injection view

여 영상분석기(photometric image analyzer, PIA)를 이용하여 기포 크기를 가시화하여 분석했으며 오존기포 크기 및 개수의 수질적 효과를 확인하기 위하여 잔류오존농도, UV₂₅₄ 흡광도의 변화를 고찰하였다.

PIA 장치는 수처리 공정에서 플록, 미세 기포입자 등을 펌프를 이용하여 일정 속도로 3~10 mm의 플로우셀에 통과시켜 현미경을 이용하여 물속에 존재하는 5 μm이상의 입자를 관측하고, 고속카메라로 초당 110장 이상 연속적으로 초고속 촬영하여 컴퓨터로 미세기포 입자의 크기변화를 직접적으로 화상을 통하여 분석한다. 구성품으로는 현미경, 고속카메라, 영상분석기, 유동셀 등이며 아래 Fig. 4는 본 연구에 사용하기 위하여 제작된 유동셀을 포함한 PIA장비이다.

3. 이론적 고찰

다상 유동은 크게 기체, 액체, 고체의 상태가 혼합된 상태의 유동현상으로 크게 Fig. 5에 나타난 유동의 형태로 분류할 수

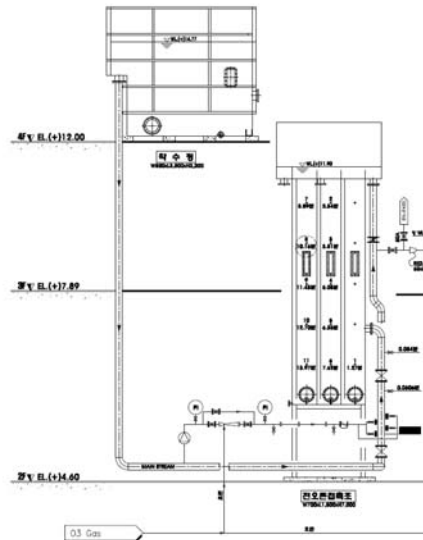


Fig. 3 Side stream ozone injection front section view

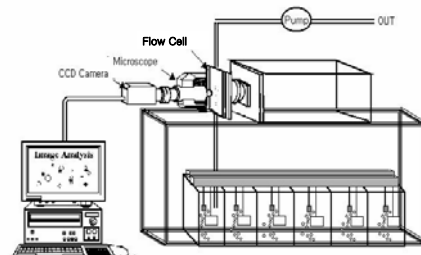


Fig. 4 PIA device schematic diagram

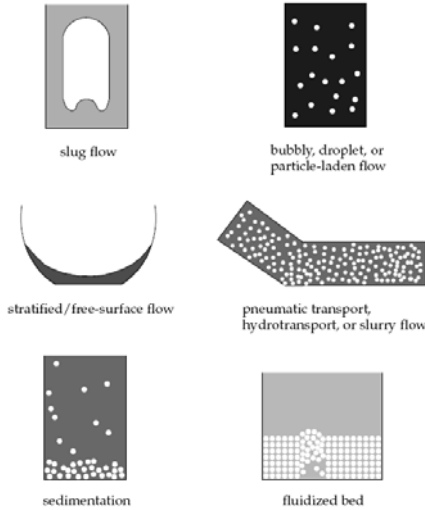
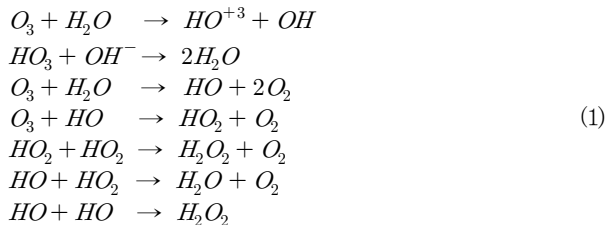


Fig. 5 Multiphase flow regimes

있다. 오존을 이용하여 원수를 소독하는 공정에 대한 유동은 액체(물)와 기체(오존) 상태의 두 유체가 혼합된 유동 형태를 보인다. 기체와 액체가 혼합된 유동은 크게 기포유동(bubbly flow), 물방울유동(droplet flow), 슬러그유동(slug flow), 자유표면유동(free-surface flow) 등 4가지 형태로 분류할 수 있으며, 본 연구에서 나타나는 유동 패턴은 연속적인 액체(물) 유동내에 기포(오존)가 존재하는 기포유동으로 규정할 수 있다.

오존(O₃)은 수용액 중에서 pH나 온도상승에 따라 급속하게 분해한다. 그 구조는 복잡하고 수종의 화학종이 관여하며 연쇄 반응으로 분해되어 생성된 자유기(Free Radical) HO는 오존 분자보다도 강력한 산화제로 된다. 따라서 오존처리란 오존분자에 의한 직접반응(O₃+대상물질→산화물)과 자유기 HO에 의한 간접반응(O₃→HO, HO+대상물질→산화물) 모두가 주반응이 된다. 오존의 수중에서의 분해반응은 아래 식(1)과 같다.



수중에서 기포는 밀도차에 의해 어느 정도의 상승속도를 갖게 된다. 기포의 체류시간은 용해효율에 크게 영향을 미치게 되며, 기포 크기가 작으면 작을수록 수중에서의 체류시간은 길어지며 그 만큼 용해효율은 증가하게 된다. 입자의 운동방정식은 기포의 경우 관성력=부력-중력-저항력으로 나타나며 식

(2)와 같이 정의 된다. 발생된 기포가 층류에서 부상한다고 가정하면 식(3)에서 좌변은 “0”이된다. 여기서 v (종단속도, m/s), ρ_p (입자밀도 kg/m³), ρ_w (유체밀도 kg/m³) g (중력가속도, 9.81m/sec²) d_p (입자직경 m), V_p (입자부피 m³), A_p (입자면적 m²), C_D (항력계수)이다.

$$V_p \rho_p \frac{dv}{dt} = V_p \rho_w g - \frac{1}{2} C_D A_p \rho_p V^2 \tag{2}$$

$$\frac{\pi d_p^3}{6} \rho_p \frac{dv}{dt} = \frac{\pi d_p^3}{6} \rho_w g - \frac{\pi d_p^3}{6} \rho_p g - \frac{1}{2} C_D \frac{\pi d_p^2}{4} \rho_p V^2 \tag{3}$$

혼합 교반계에서의 기액간의 물질이동은 일반적으로 이중경막설(Two Film Theory)에 의해서 설명된다. 접촉계면에서 평형상태로 하고 경막 내에서의 축적·소멸이 없을 때에는 경막 내에서의 물질 이동은 식(4)의 Fick의 제2법칙에서 다음과 같이 된다.

$$\frac{\partial A}{\partial t} = D_A \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} = 0 \tag{4}$$

기상에서 액상으로의 물질이동은 Fig. 7과 같이 상대적으로 정지한 계면 및 가스측과 액상의 유효경막을 가정하여 설명된다. 정상상태에서는 양쪽 경막을 확산하고 있는 양은 같기 때문에 가스측 및 액측의 물질 이동계수를 각각 k_G 및 k_L 로 하면 물질이동 플럭스는 식(5)와 같이 된다. 희박농도 용액의 경우에는 기체중의 물질 분압과 액체중의 평형농도와의 사이에 식(6)의 헨리의 법칙이 성립한다.

$$N = k_G(P_{AG} - P_{Ai}) = k_L(C_{Ai} - C_{AL}) \tag{5}$$

$$P_{Ai} = m C_{Ai} \quad (m : Henry \text{ 정수}) \tag{6}$$

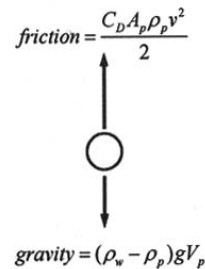


Fig. 6 Microbubble terminal velocity

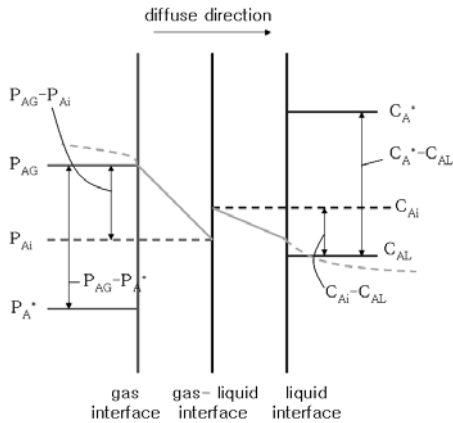


Fig. 7 Two-film theory

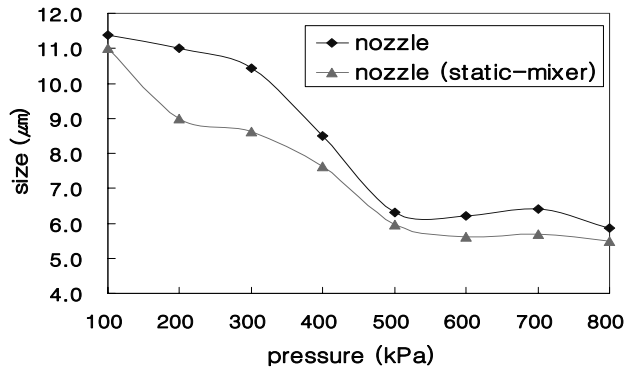


Fig. 8 Bubble size on the nozzle with static mixer or without

여기서 K_G 및 K_L 은 각각 가스측 및 액측의 총괄물질이동계수이며 양자사이에는 식(7)과 같은 관계식이 성립한다. 일반적으로 기상중에서의 오존 확산속도는 액상중의 확산속도보다 10^3 배이상 빠르기 때문에 계면을 통한 물질이동저항은 액측 경막에서의 이동저항이 지배적이다. 여기서 K_{La} 는 총괄 물질이동 용량계수이며 식(8)과 같이 기액접촉조의 가스흡수특성의 평가에 이용된다.

$$\frac{1}{K_G} = \frac{m}{K_L} = \frac{1}{k_G} + \frac{m}{k_L} \quad (7)$$

$$\frac{dC_{AL}}{dt} = K_{La}(C_A^* - C_{AL}) \quad (8)$$

4. 결과 및 분석

4.1 압력변화 및 난류인자에 따른 기포크기

사이드스트림 오존배관과 원수 주배관이 연결되는 노즐 후 단 1m 지점에서 기포크기를 고찰하였다. 사이드스트림 배관의

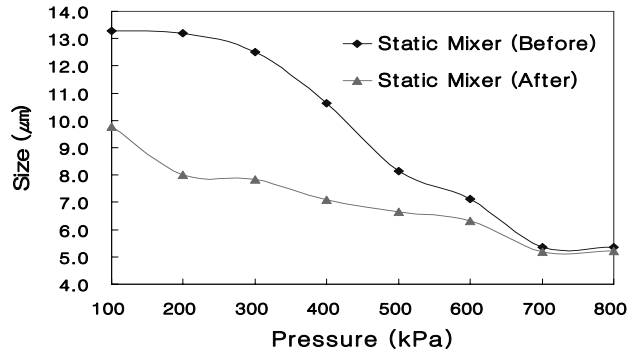
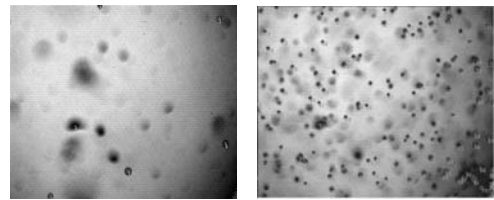


Fig. 9 Bubble size on the before & after static mixer



(A) Before (B) After

Fig. 10 Bubble size on the before & after static mixer (200kPa)

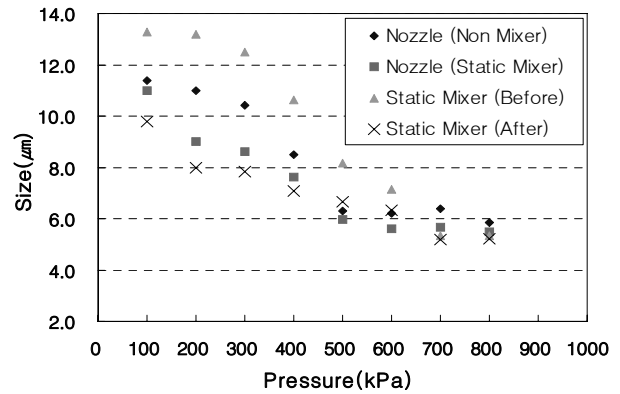


Fig. 11 Bubble size on the nozzle & static mixer

압력을 100~800kPa로 가압하고 기액비를 점차 줄인 경우 Fig 8에서와 같이 500kPa 범위까지는 압력을 증가할 경우 오존 기포의 크기는 11μm에서 6μm 크기까지 작아졌으며 500kPa 이상에서는 기포크기의 변화가 없었다. 또한 정적믹서가 있는 경우가 없는 경우에 비하여 평균기포 크기는 약 1μm 작았다. 압력을 500kPa이상 상승하더라도 기포 크기만을 고려할 경우 체류속도의 차이가 적어 수질효과의 큰 차이를 기대하기 어렵다.

정적믹서 직전·후단에서 기포크기를 조사한 결과 Fig. 9와 같이 정적믹서 직전과 직후의 기포크기는 압력이 클수록 작아지는 현상을 나타 내었으나 압력이 700kPa이상이 되었을 경우에 기포 크기의 차이가 거의 없어졌다. 그러나 정적믹서가 있는 경우와 그렇지 않은 경우에는 기포의 개수는 Fig. 10에서

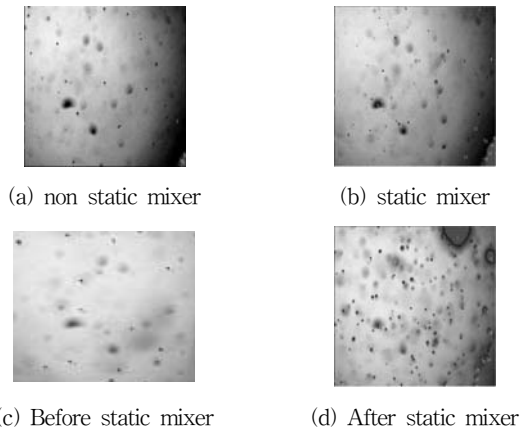


Fig. 12 Bubble size on the nozzle & static mixer (500kPa)

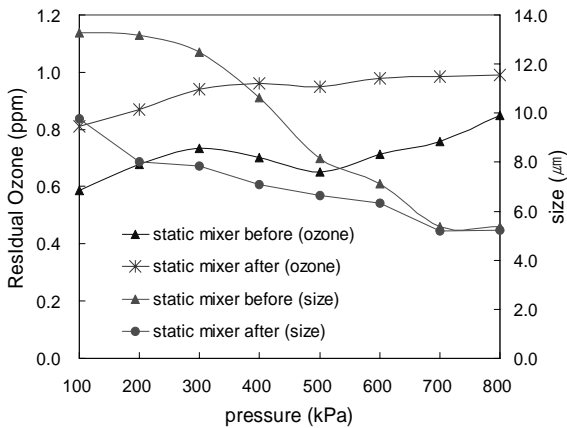


Fig. 13 Relation of bubble size & residual ozone on the before & after static mixer

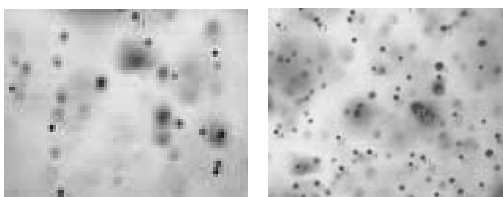


Fig. 14 Bubble size at the static mixer before & after (500kPa)

와 같이 정적믹서가 있는 경우가 약 20% 많게 확인되었으며, 이것은 잔류오존농도, UV₂₅₄ 흡광도 등 수질적인 측면에 차이를 보이게 하는 요인으로 작용한다.

Fig. 11에서와 같이 압력이 상승하는 경우 기포의 크기도 작아졌으며 정적믹서 후단에서의 오존가스 기포 크기가 가장 작았고 사이드스트림 원수 압력이 800kPa에 도달한 경우 측정 위치, 정적믹서 유무에 관계없이 기포는 약 5.5~6μm 크기에 도달했다. Fig. 12는 500kPa 압력에서 정적믹서 유무, 전후

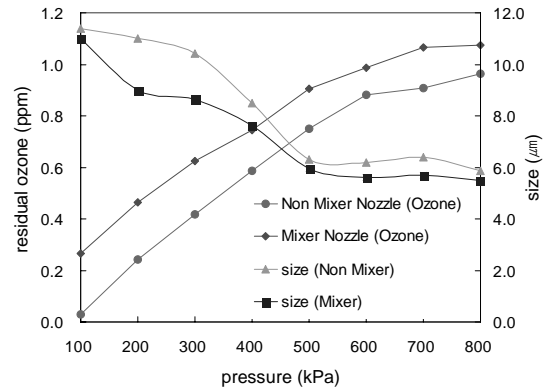


Fig. 15 Relation of bubble size & residual ozone on the nozzle with static mixer or without

위치에서 기포의 크기를 가시화했으며 정적믹서가 있는 경우의 후단부에서는 기포 크기의 차이는 거의 없었으나 PIA를 이용한 결과 기포 개수는 뚜렷한 차이를 보였으며 이것은 사이드 스트림 배관 내에서 기액비, 수질, 수압 등 여러 요인에 의한 결정되지만 정적믹서의 영향도 크게 작용했다.

4.2 기포크기와 잔류오존의 상관관계

사이드스트림 오존배관에서 정적믹서 직전·후단의 잔류오존과 기포의 크기를 비교하였다. Fig.13 에서와 같이 정적믹서 직전의 평균 기포크기는 약 13μm이고 직후단의 크기는 약 10μm 이며 이때 정적믹서 직전의 잔류오존 농도는 약 0.6ppm, 직후단 잔류오존은 약 0.8ppm 이었다. 사이드스트림 오존배관의 압력을 800kPa까지 상승한 경우 정적믹서 전·후단의 잔류오존은 0.8ppm, 1.0ppm으로 각각 0.2ppm 상승하였으나 기포의 크기는 약 0.55μm 크기로 거의 같아졌다. 기포의 크기는 같아졌으나 잔류오존의 편차가 발생하는 이유는 Fig.14 에서와 같이 정적믹서 전·후단의 기포개수 차이가 원인으로 확인되었다.

사이드스트림 오존배관과 원수 주배관이 연결되는 노즐 후단 1m 지점에서 잔류오존과 기포 크기의 관계를 비교했다. 배관의 압력을 100~800kPa로 가압하고 기액비를 늘린 경우 200kPa 압력에서는 잔류오존이 각 0.25ppm 0.45ppm이었고 오존기포의 크기는 약 9μm 크기로 확인되었다. 이에 비하여 압력을 800kPa 까지 상승한 경우 잔류오존 농도는 약 1ppm까지 상승하였고 기포의 크기는 6μm 보다 작아졌다. Fig.15에서와 같이 압력증가에 따라 잔류오존 농도는 증가하고 기포의 크기는 작아지는 반비례 관계의 경향을 보이고 있으며 압력이 500kPa이상부터는 기포의 크기는 약5.5~6μm 크기로 변화가 거의 없는 반면 잔류오존 농도의 차이는 정적믹서 유무와 압력에 관계없이 일정한 편차를 유지했으며 압력이 증가할수록 잔

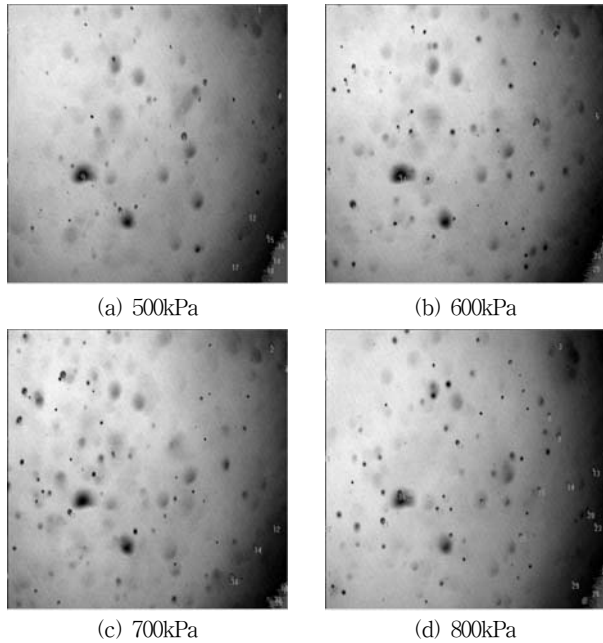


Fig. 16 Bubble size on the nozzle with static mixer

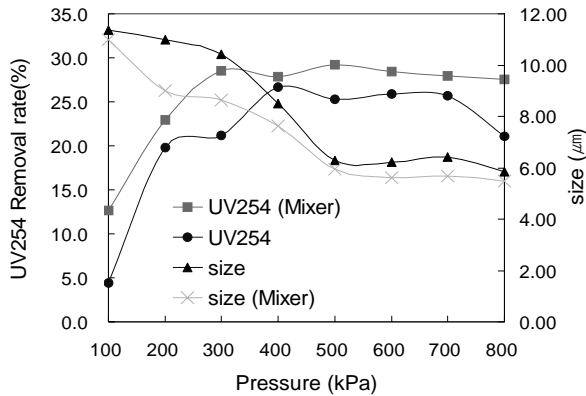


Fig. 17 Relation of UV₂₅₄ & size on the nozzle with static mixer or without

류오존 농도는 증가하는 추세를 나타낸다. Fig. 16은 500~800kPa범위에서 기포의 크기와 개수를 보여주고 있으며 입경의 차이는 근소하나 기포 개수가 증가하는 추세를 보였다.

4.3 UV₂₅₄ 흡광도와 기포 크기, 잔류오존의 상관관계

사이드스트림 오존배관에 정적믹서를 설치한 경우와 그렇지 않은 경우에 대하여 UV₂₅₄ 조사에 의한 유기물 제거와 기포 크기의 관련성을 연구하였다. Fig.17에서와 같이 100~300kPa 범위에서는 UV₂₅₄ 조사에 의한 유기물 제거율이 5%→25%로 급격하게 상승하였으며 기포 크기도 11 μ m에서 7 μ m 크기로 감소하였다. 사이드스트림 배관의 압력을 500kPa이상으로 상승한

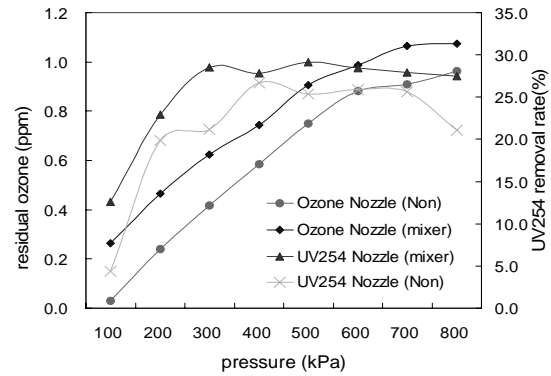


Fig. 18 Relation of UV₂₅₄ & residual ozone at the nozzle with static mixer or without

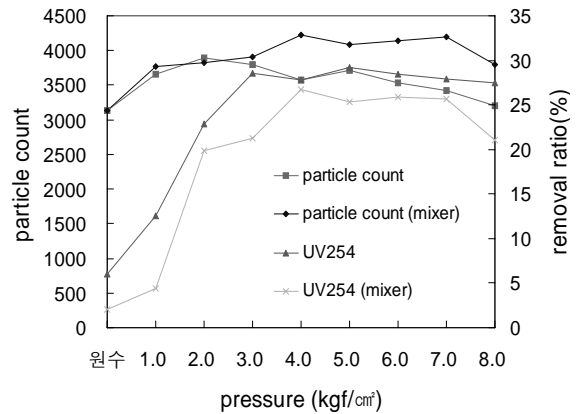


Fig. 19 Relation of UV₂₅₄ & particle count at the nozzle with static mixer or without

경우에는 정적믹서 유무에 관계없이 UV₂₅₄ 조사에 의한 유기물 제거율이 각각 평행한 추세를 보였고 정적믹서 설치에 따라 약 5% 정도의 차이를 보였고 기포크기는 약 6 μ m 정도를 유지하였다. UV₂₅₄ 제거율과 기포 크기는 압력 300kPa까지는 상호 반비례적이며 500~800kPa까지는 서로 평행한 추세를 보였다. 기포크기와 UV₂₅₄ 조사에 의한 유기물 제거율을 고려할 경우 사이드스트림 오존설비 운영압력은 약 300kPa에서 정적믹서 설치효과가 극대화될 수 있다.

노즐 1m 후단 원수배관에서 정적믹서를 설치한 경우와 그렇지 않은 경우에 대하여 잔류오존과 UV₂₅₄ 조사에 의한 유기물 제거율의 관계를 살펴보았다. Fig.18에서와 같이 100~300kPa 범위까지는 UV₂₅₄ 조사에 의한 유기물 제거율이 압력 상승에 따라 급격히 증가하였고 잔류오존 농도도 상승하는 추세를 나타냈으나 400~800kPa 압력범위에서는 UV₂₅₄ 조사에 의한 유기물 제거율은 증가함 없이 평행하였으나 잔류오존 농도는 계속적으로 상승하는 경향을 보였다. 또한, UV₂₅₄ 조사에 의한 유기물 제거와 잔류오존은 정적믹서가 있는 경우가 없는

경우에 비하여 높게 확인되었다.

노즐 1m 후단의 원수배관에서 정적믹서를 설치한 경우와 그렇지 않은 경우에 대하여 UV₂₅₄ 조사에 의한 유기물 제거율과 기포개수의 상관관계를 살펴보았다. Fig. 19에서와 같이 100~300kPa 범위까지는 UV₂₅₄ 조사에 의한 유기물 제거율은 증가하였으나 기포 개수는 원수의 기포개수에 비해 100kPa까지는 증가하였으나 300kPa 범위까지는 기포개수의 증가는 없었다. 사이드스트림 오존배관의 압력을 800kPa 범위까지 상승하면서 실험한 결과 300kPa이상 범위에서는 정적믹서가 설치된 경우와 그렇지 않은 경우에 있어 기포 개수의 평행한 추이를 보이며 800kPa까지 유지되었으며 이때 UV₂₅₄ 조사에 의한 유기물 제거도 기포개수와 비슷한 추세를 보였다. 입자계수기를 이용하여 입자 개수를 측정할 자료와 UV₂₅₄ 조사에 의한 유기물 제거율은 300~800kPa 범위에서 각각 평행한 경향을 보였다.

5. 결 론

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 사이드스트림 원수의 압력을 100~800kPa 범위까지 조절하면서 미세오존 기포의 크기를 상호 비교한 결과 정적믹서가 설치된 노즐 후단에서 오존가스 기포 크기가 가장 작았고 다음은 정적믹서 후단, 정적믹서 전단 그리고 정적믹서가 없는 nozzle 후단 순서로 기포의 크기가 상호 비교되었다.

2) 오존 기포의 크기가 작아짐에 따라 잔류오존 농도는 증가하였다. 500kPa이상의 압력에서는 기포 크기의 변화가 거의 없었으나 잔류오존 농도는 증가하는 추세를 보였다.

3) 500~800kPa 압력범위에서 오존 기포 크기가 일정한 크기를 유지했고 UV₂₅₄ 조사에 의한 유기물 제거율의 변화도 거의 없었다.

4) 입자계수기로 오존가스 기포 개수를 측정할 결과 300~800kPa 압력범위에서는 오존가스 기포의 개수도 증가하지 않았으며 UV₂₅₄ 조사에 의한 유기물 제거율도 증가 없이 평행한

경향을 보였다.

5) 정적믹서가 있는 경우가 없는 경우에 비하여 오존 입경도 작고 잔류오존농도, 미세기포 개수, UV₂₅₄ 흡광도 등 본 연구에서 고찰한 전체 항목에서 우수하게 평가되었다.

따라서 오존 가스의 용해 효율을 높이는 방법중 정적믹서의 영향이 상당히 중요한 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) Kerwin L. Rakness, 2005, Ozone In Drinking Water Treatment, American Water Works Association, pp. 109~115, pp. 150~157.
- (2) Bruno Langlais, 1991, Ozone In Water Treatment Application & Engineering, American Water Works Association, pp. 112~121.
- (3) Lee see young, 2003, A study of dissolved characteristics by ozone contactor type in the city water and sewage, 대한상하수도학회 논문집, pp. D97~103
- (4) Jung key joo, 2007, A study on non-discharge sludge system by Microbubble Ozone, 대한상하수도학회 논문집, pp. B66~70.
- (5) Jianping Zhang, 2006, An Integrated Design Approach for Improving Drinking Water Ozone Disinfection Treatment Based on Computational Fluid Dynamics, Ph.D, University of Waterloo, pp. 54~63.
- (6) 宗宮, 1989, 오존을 이용한 수처리 기술, 동화기술, pp. 173~177.
- (7) Kang tae hee, 2006, A Study on the Ozone Consumption Rate for Drinking Water Treatment Process with Ozone Application, 대한환경공학회지, pp. 663~669.
- (8) Seok-jong Byun, 2004, Application of high-performance Jet Loop Reactor for the Decolorization of Reactive black 5 and Mineralization of Oxalic Acid by Ozone, Journal of Korean Society on Water Quality, Vol. 20, NO. 1, pp. 78~85.