

사이드스트림 오존 접촉조에서 수처리 효율 향상을 위한 정적혼합기와 미세기포에 관한 연구

A Study on the Static mixer and Microbubble of the Sidestream Ozone Contact System to Improve Water Treatment Efficiency

김진훈^{1*} · 박종호²

Jin-Hoon Kim^{1*} · Jong-Ho Park²

1 한국수자원공사, 2 충남대학교

(2009년 10월5일 접수, 2009년 12월7일 채택)

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.

Key words : Sidestream, Ozone, Microbubble, static-mixer

주제어 : 사이드스트림, 오존, 미세기포, 정적혼합기

1. 서론

수처리에서 오존의 사용은 최근에 들어 오존의 살균력뿐만 아니라 그 외의 많은 부가적인 처리효율 증대에 대해 인식하게 되면서부터 정수처리에 오존 적용이 많아지게 되었으며 국내에서도 대규모 정수처리 공정에 오존 처리법을 이용하고 있으며 그 적용 범위가 넓어지고 있다.

오존처리는 오존의 강력한 산화력을 이용하여 분해·제거하거나 원수 중에 있는 미량유기물질의 성상을 변화시킨 후 활성탄에 흡착시켜 제거하는 방법으로 활용할 수 있으며 THM 전구물질이나 맛·냄새물질의 제거에 효과적이다. 또

한 오존은 살균효과가 우수하여 소량의 접촉에 의해서도 대부분의 세균을 사멸시키며, 염소 살균과는 다르게 THM 등의 유기염소계 화합물을 생성시키지 않아 이산화염소와 함께 대체 살균제로 사용할 수 있다.

현재까지 개발된 오존접촉방식은 산기관식, 정적혼합방식, 가스확산방식, 기계교반식, 가압 인젝터식, 벤투리 이젝터식 등이 개발되어 사용되고 있으나 최근에 오존설비를 도입하는 경우에는 대부분 사이드 또는 풀 스트림(side or full stream) 방식을 설치하고 있다. 본 연구는 사이드스트림 배관에 흐르는 원수 압력, 수량 변화에 따른 기포크기 및 개수 변화, UV₂₅₄ abs 변화, 잔류오존 농도변화 등 각 항목의 상관

* Corresponding author Tel:+82-42-870-7267, Fax:+82-42-870-7549, E-mail: jinhoon@kwater.or.kr(Kim, J.H.)

관계를 고찰하였고 정적혼합기가 오존기포 크기 및 수처리 효과에 미치는 영향을 고찰하였다.

2. 실험설비 및 분석방법

본 연구는 1,000m³/일 규모의 정수장 실증플랜트에서 실시하였고 10m 높이의 물탱크로부터 오존 접촉조로 자연유하 하는 주 배관에서 분기된 사이드스트림 배관에 Fig. 1과 같이 인젝터, 정적혼합기, 노즐 순으로 설치하였다. 인젝터로 흡입된 오존 가스는 고농도 오존수가 되며 노즐 분사에 의해 주 배관에 다시 합류되고 오존 접촉조로 유입되어 일정 체류시간 동안 수중에서 반응하게 된다.

샘플링은 사이드스트림 압력, 유량을 변화시켜가면서 정적혼합기 전후단, 노즐 후단, 오존 접촉조에서 시료를 채취하여 기포크기, 기포개수, 잔류오존농도, UV₂₅₄ abs 등 각 항목을 측정·분석하였다.

오존 기포 크기를 측정하기 위하여 각 샘플 포트와 광도영상분석기(photometric image analyzer, PIA)를 투명 관으로 연결하고 시료를 일정 속도로 3~10 mm의 유동셀에 통과시켜 현미경을 이용하여 물속에 존재하는 5 μm이상의 기포를 관측하였다. 고속카메라로 초당 110장 이상 연속적으로 초고속 촬영하여 Fig. 2와 같이 컴퓨터로 미세기포의 크기변화를 화상을 통하여 분석하고 기포 크기를 측정했다.

잔류오존농도는 1ppm 이하에서는 샘플 포트에 직접 투명관을 연결하여 용존용 오존측정기를 사용하여 측정하였으며 측정기의 측정 범위 1ppm을 초과한 경우에는 시료를 채취하여 인디고 시약에 의한 방법으로 측정했다. UV₂₅₄ 흡광도 분석도 시료를 채취하여 분광광도계를 이용하여 측정했다. 장비의 측정 파장 범위(170~330nm), 분해능(0.01

nm), 투과도(고체 5mm지름 이상)이다. 오존기포 개수는 입자계수기를 이용하여 수중에 존재하는 입자와 기포의 개수를 측정·분석했다.

3. 이론적 고찰

다상 유동은 기체, 액체, 고체의 상태가 혼합된 상태의 유동현상으로 Fig. 3에 나타난 유동의 형태로 분류할 수 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, 물방울유동, 슬러그유동, 자유표면유동의 4가지 형태로 분류할 수 있으며, 본 연구에서 나타내는 유동 패턴은 연속적인 액체(물) 유동내에 기포(오존)가 존재하는 기포유동으로 규정할 수 있다.

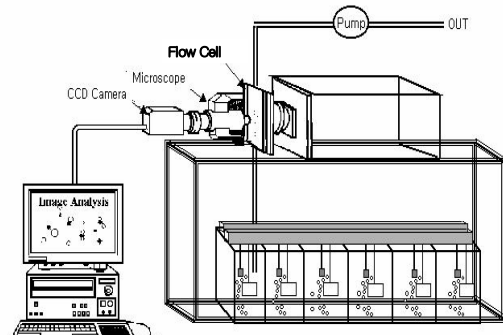


Fig. 2 PIA device schematic diagram

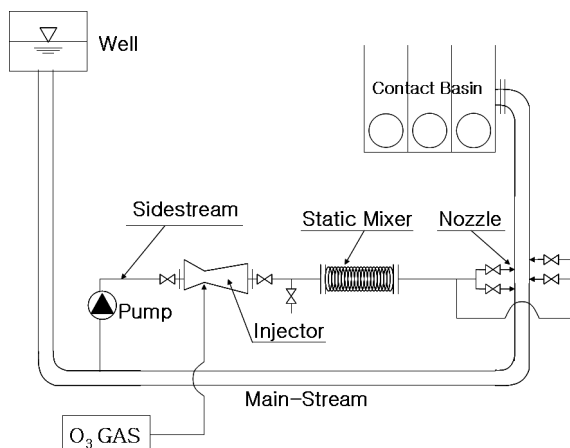


Fig. 1 Schematic view of the side stream ozone injection system

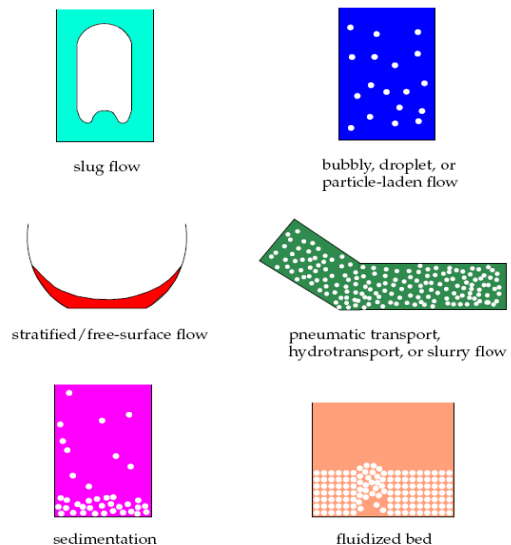


Fig. 3 Multiphase flow regimes

수중에서 기포는 밀도차에 의해 어느 정도의 상승속도를 갖게 된다. 기포의 체류시간은 용해효율에 크게 영향을 미치게 되며, 기포의 크기가 작으면 작을수록 수중에서의 체류시간은 길어지며 그 만큼 용해효율은 증가하게 된다. 입자의 운동방정식은 Fig. 4와 같이 기포의 경우 관성력=부력-중력-저항력으로 나타나며 식(1)와 같이 정의 된다. 여기서 v (종단속도, m/s), ρ_p (기포밀도 kg/m³), ρ_w (유체밀도 kg/m³) g (중력가속도, 9.81m/sec²) d_p (기포직경 m), A_p (기포면적 m²), C_D (항력계수)이다.

$$\frac{\pi d^3}{6} \rho_p g = \frac{\pi d^3}{6} \rho_w g + C_D \frac{1}{2} \rho_w v^2 A_p \quad (1)$$

$$v_t = \sqrt{\frac{4gd_p}{3C_D} \left(\frac{\rho_p - \rho_w}{\rho_w} \right)} \quad (2)$$

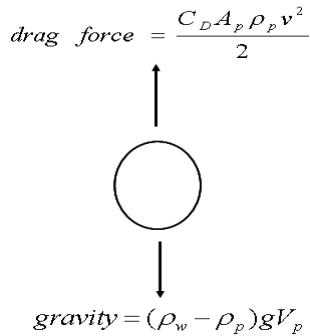


Fig. 4 Microbubble terminal velocity

혼합 교반계에서의 기액간의 물질이동은 일반적으로 이중경막설(Two Film Theory)에 의해서 설명된다. 접촉계면에서 평형상태로 하고 또 경막 내에서의 축적·소멸이 없을 때에는 경막 내에서의 물질의 이동은 식(3)의 픽스(Fick)의 제2법칙에서 다음과 같이 된다.

$$\frac{\partial A}{\partial t} = D_A \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} = 0 \quad (3)$$

기상에서 액상으로의 물질이동은 Fig. 5에 보이는 것같이 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 플러스는 식(4)와 같이 된다. 희박농도 용액의 경우에는 기체중의 물질 분압과 액체중의 평형농도와의 사이에 헨리의 법칙식(5)이 성립한다.

$$N = k_G(P_{AG} - P_{Ai}) = k_L(C_{Ai} - C_{AL}) \quad (4)$$

$$P_{Ai} = m C_{Ai} \quad (m : \text{Henry 정수}) \quad (5)$$

여기서 K_G 및 K_L 은 각각 가스측 및 액측의 총괄물질이동계수이고 양자사이에는 식(6)과 같은 관계식이 성립한다. 일반적으로 기상중에서의 오존 확산속도는 액상중의 확산속도보다 10³배이상 빠르기 때문에 계면을 통한 물질이동저항은 액측 경막에서의 이동저항이 지배적이다. 식(7)에서 K_{La} 는 총괄 물질이동 용량계수이며 기액접촉조의 가스흡수특성의 평가에 이용된다.

$$\frac{1}{K_G} = \frac{m}{K_L} = \frac{1}{k_G} + \frac{m}{k_L} \quad (6)$$

$$\frac{dC_{AL}}{dt} = K_{La}(C_A^* - C_{AL}) \quad (7)$$

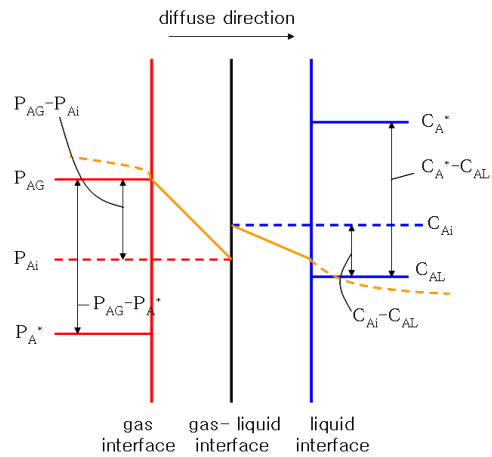


Fig. 5 Two-film theory

4. 결과 및 분석

4.1 정적혼합기 유·무에 따른 효과분석

사이드스트림 오존배관과 원수 주배관이 연결되는 노즐 후단 1m 지점에서 기포크기를 고찰하였다. 사이드스트림 배관의 압력을 100~800kPa로 가압하고 기액비를 점차 줄인 경우 Fig 6에서와 같이 500kPa범위까지는 압력 증가에 따라 오존 기포의 크기는 13 μ m에서 5.5 μ m 크기까지 작아졌으며 500kPa이상 압력에서는 기포크기의 변화가 거의 없었다. 또한, 정적혼합기가 있는 경우가 없는 경우에 비하여 평균기포 크기가 약 1~2 μ m 작았다.

기포크기와 잔류오존의 관계를 분석한 결과 200kPa에서는 잔류오존이 각 0.25ppm 0.45ppm이었고 오존 기포의

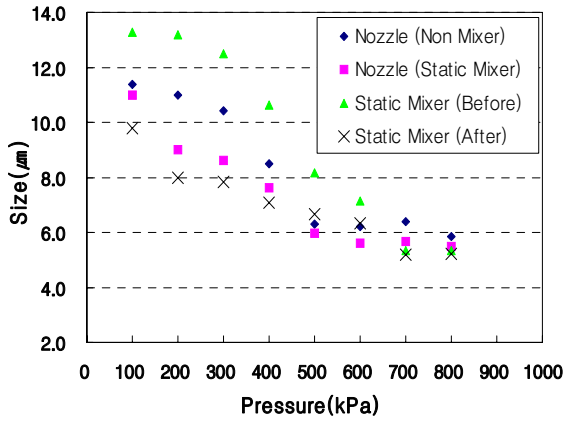


Fig. 6 Particle size on the nozzle with static mixer or without static mixer

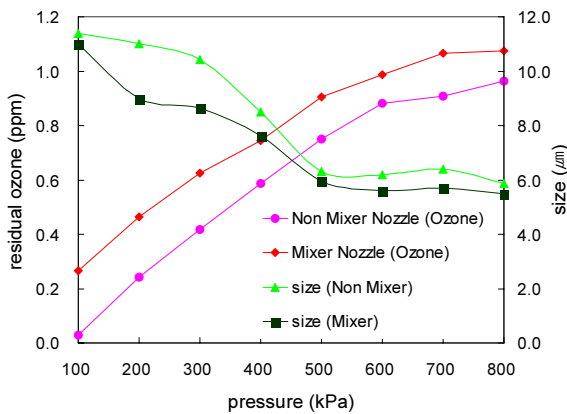


Fig. 7 Relation of particle size and residual ozone on the nozzle with static mixer or without static mixer

크기는 약 $9\mu\text{m}$ 크기로 확인되었다. 이에 반하여 압력을 800kPa까지 상승한 경우 잔류오존은 약 1ppm까지 상승하였고 기포의 크기는 약 $6\mu\text{m}$ 크기 보다 작아졌다. Fig. 7에서와 같이 압력증가에 따라 잔류오존 농도는 증가하고 기포의 크기는 작아지는 반비례적인 경향을 보이고 있으나 압력이 500kPa이상부터는 기포의 크기는 약 $6\mu\text{m}$ 크기로 변화가 거의 없는 반면 잔류오존 농도의 차이는 정적혼합기 유무와 압력에 관계없이 일정한 편차를 보이고 있으나 압력이 증가할수록 잔류오존은 증가하는 추세를 나타낸다. Fig. 8은 500~800kPa범위에서 기포의 크기와 개수를 보여주고 있으며 기포 크기의 차이는 근소하나 기포 개수가 증가하는 추세를 보였다.

노즐 1m 후단의 원수 배관에서 정적혼합기를 설치한 경우와 그렇지 않은 경우에 대하여 UV₂₅₄ 흡광도 제거율과 기포

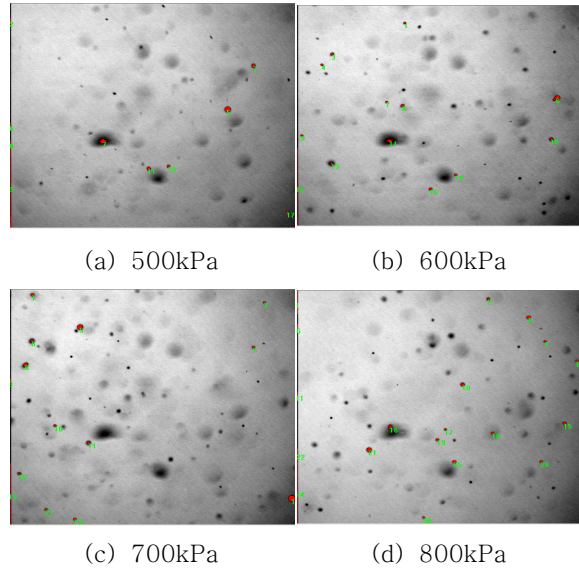


Fig. 8 Particle size on the nozzle with static mixer

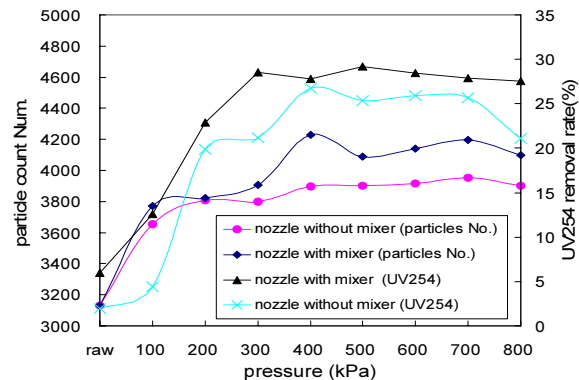


Fig. 9 Relation of UV254 abs and particle count at the nozzle with static mixer or without static mixer

개수의 상관관계를 살펴보았다. Fig. 9에서와 같이 100~300kPa 범위까지는 UV₂₅₄ 흡광도 제거율과 기포 개수는 원수 대비 증가하였다. 사이드스트림 오존배관의 압력을 800kPa범위까지 상승하면서 실험한 결과 300kPa이상 범위에서는 정적혼합기가 설치된 경우와 그렇지 않은 경우에 있어 기포 개수의 차이를 보이며 뚜렷한 증가없이 평행을 유지하는 추세였으며 이때 UV₂₅₄ 흡광도 제거도 기포 개수 변화도 비슷한 경향을 보였다.

사이드스트림 오존배관에 정적혼합기를 설치한 경우와 그렇지 않은 경우에 대하여 UV₂₅₄ 흡광도 제거와 기포 크기의 관련성을 연구하였다. Fig. 10에서와 같이 100~400kPa 범위에서는 UV₂₅₄ 흡광도 제거율이 5%에서 25%로 급격하

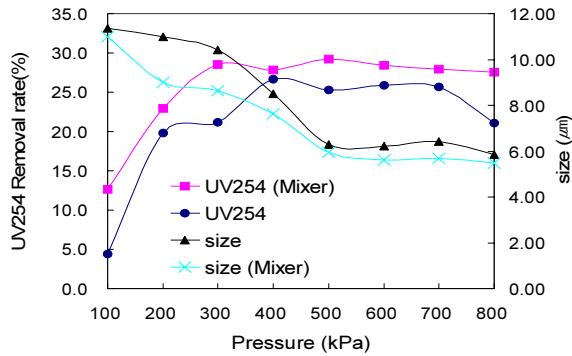


Fig. 10 Relation of UV254 abs and size at the nozzle with static mixer or without static mixer

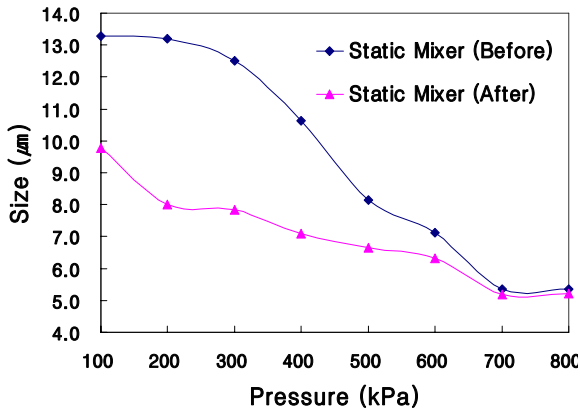
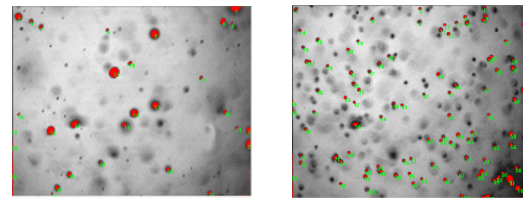


Fig. 11 Particle size at the before and after static mixer

게 상승하였으며 기포 크기도 11 μ m에서 7 μ m 크기로 감소하였음을 알 수 있었다. 사이드스트림 오존배관의 원수 압력을 400kPa이상으로 상승한 경우에는 정적혼합기 유무에 관계없이 UV₂₅₄ 흡광도 제거율이 각각 평행 또는 감소하는 추세를 보였으나 정적혼합기 설치 유무에 따라 약 5% 정도의 차이를 보였고 기포 크기는 약 7 μ m를 유지하였다. 이와 같이 UV₂₅₄ 흡광도와 기포 크기는 압력 300kPa까지는 상호 반비례적이며 500~800kPa까지는 서로 평행한 추세를 보였다. 기포 크기와 UV₂₅₄ 흡광도 제거율을 고려할 경우 사이드스트림 오존설비 운영압력은 약 300kPa에서 정적혼합기 설치효과가 극대화될 수 있다.

4.2 정적혼합기 전·후단의 기포 크기 관계

정적혼합기 직전·후단에서 100~800kPa 압력범위에서 기포 크기를 조사한 결과 Fig.11과 같이 700kPa이상 압력이 되었을 경우에 기포크기의 차이가 거의 없어지고 동일 크기가 되었다. 그러나 정적혼합기가 있는 경우와 그렇지 않은 경우에는 기포의 개수는 Fig.12에서와 같이 정적혼합



(A) before (B) after

Fig. 12 Particle size at the before and after static mixer(200kPa)

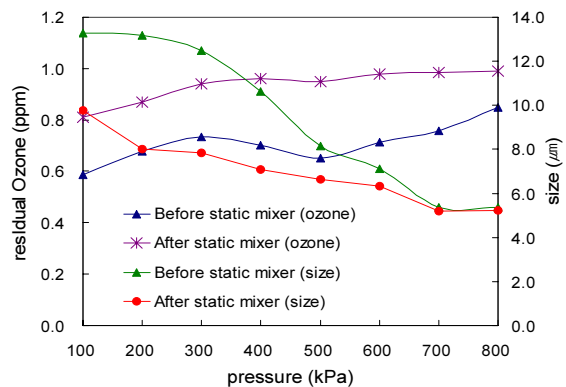
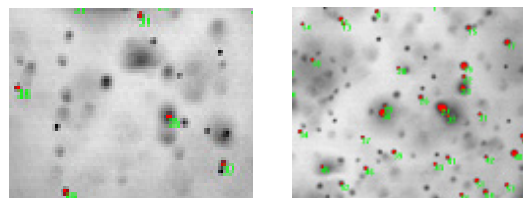


Fig. 13 Relation of particle size and residual ozone on the before and after static mixer



(A) before (B) after

Fig.14 Particle size at the before and after static mixer (500kPa)

기가 있는 경우가 약 20% 많게 확인되었으며, 이것은 잔류 오존농도, UV₂₅₄ 흡광도등 수질적인 측면에 차이를 보이게 하는 요인으로 작용한다.

사이드스트림 오존배관에서 정적혼합기 직전·후단의 잔류 오존과 기포의 크기를 비교하였다. Fig. 13 에서와 같이 정적혼합기 직전의 평균 기포크기는 약 13 μ m이고 직후단의 크기는 약 10 μ m이며 이때 정적혼합기 직전의 잔류오존은 약 0.6ppm, 직후단 잔류오존은 약 0.8ppm 이었다. 사이드 스트림 오존배관의 압력을 800kPa까지 상승한 경우 정적혼합기 전·후단의 잔류오존은 0.8ppm, 1.0ppm으로 각 0.2ppm 상승하였으나 기포의 크기는 약 0.55 μ m 크기로 같아졌다. 기포의 크기는 같아졌으나 잔류오존의 편차가 발생하는 이유는 Fig. 14 에서와 같이 정적혼합기 전·후단의 기포 개수 차이가 원인으로 확인되었다.

4.3 동력비와 오존 주입량의 관계

사이드스트림방식에서 사용된 에너지는 물탱크로부터 분기관까지는 전체 유량에 대하여 자연유하에 의한 수두차가 적용되며 사이드스트림 유량 10%는 펌프로 가압하여 오존과 혼합 되므로 소비되는 동력은 $(\gamma \times Q \times H) \times 0.1$ 만큼 추가 소요된다.

인젝터 전후의 압력차를 크게 할 경우 오존가스를 미세기포로 만들 수 있어 수처리에 필요한 오존 요구량이 감소하게 되어 오존 발생에 소요되는 전력비를 줄일 수 있다. 그러나 사이드스트림 배관의 압력, 유량을 과대하게 증가 시키는 경우 오히려 전체 전력소비량이 높아져 경제성이 떨어질 수도 있다. 따라서 처리대상 수질변화에 따라 요구되는 오존 주입량과 사이드스트림 배관의 운영압력, 유량의 경제성을 상호비교하여 최적의 상태를 유지하여야 한다. UV₂₅₄ 흡광도 제거율을 고려할 경우는 약 300kPa이내의 범위가 경제성적이다.

5. 결 론

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 정적혼합기가 있는 경우가 없는 경우에 비하여 100~400kPa 압력범위에서는 오존 기포 크기의 차이가 컸으며 압력이 증가 할수록 기포 크기의 차이는 작아졌고 700kPa이상에서는 정적혼합기 유무에 관계없이 약 0.55 μm 크기로 같아졌다.

2) 오존 기포의 크기가 작아짐에 따라 잔류오존 농도가 증가하였으나 500kPa이상의 압력에서는 기포 크기의 변화가 거의 없었으나 오존 기포 개수의 증가로 인하여 잔류오존 농도는 증가하는 추세를 보였다.

3) UV₂₅₄ 흡광도 제거율은 오존기포 크기가 작을수록 기포 개수가 많을수록 효과적이었으며 기포 크기에는 반비례하는 경향이 있으며 기포개수에는 비례적인 추세를 보였다.

따라서, 오존 가스의 용해 효율을 높여 잔류 오존 농도를 증가 시키는 방법으로 정적혼합기의 영향이 중요한 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. Bruno Langlais, 1991, Ozone In Water Treatment Application & Engineering, American Water Works Association, pp 112-121
2. Jung key joo, 2007, A study on non-discharge sludge system by Microbubble Ozone, 대한상하수도학회 논문집, pp B66-70
3. Kerwin L. Rakness, 2005, Ozone In Drinking Water Treatment, American Water Works Association, pp 109-115, pp 150-157
4. Lee see young, 2003, A study of dissolved characteristics by ozone contactor type in the city water and sewage, 대한상하수도학회 논문집, pp D97-103
5. 宗宮, 1989, 오존을 이용한 수처리 기술, 동화기술, pp 173-177
6. Bong Kee Kwon, 1989, An Experimental Study on Advanced Treatment of Water with Ozone, 한국상하수도학회, 제2호