

ORIGINAL ARTICLE

## 3구 노즐을 이용한 산소의 용존율 향상

박영식\*

대구대학교 기초교육대학

## Enhance of Dissolved Oxygen Rate using a 3-prong Nozzle

Young-Seek Park\*

Division of Creative Integrater General Studies, Daegu University, Gyeongbuk 712-714, Korea

### Abstract

Dielectric barrier discharge plasma is a new technique in water pollutant degradation, which that is characterized by the production of chemically active species such as hydroxyl radicals, ozone, hydrogen peroxide, etc. If dissolving of plasma gas generated in the plasma reaction has increased, it is possible to increase the contaminant removal capacity. In this study, the improvement on the dissolving performance of plasma gas was evaluated by the indirect method measuring the overall oxygen transfer coefficient. Experiments were conducted to examine the effects of nozzle type, distance from water surface, air supply rate and liquid circulation rate. The experimental results showed that the  $K_{La}$  value of the 3-prong nozzle is 2.67 times higher than the diffuser. The order of  $K_{La}$  value with nozzle type ranked in the following order: 3-prong nozzle (inner diameter, less 1 mm) > circular nozzle (inner diameter, 1.5 mm) > ellipse nozzle (short diameter 1 mm, long diameter 2.5 mm) > circular nozzle (inner diameter, 3 mm). Optimal liquid circulation rate was appeared to be 1.7 L/min, the value of  $K_{La}$  was 0.510 1/min. The value of  $K_{La}$  with increasing air supply rate was revealed in the form of an exponential such as  $K_{La} = 0.3581e^{0.2919 \times \text{air flow rate}}$ .

**Key words** : Gas flow rate, Nozzle, Oxidants dissolving, Overall oxygen transfer coefficient, Plasma

### 1. 서론

Crookes는 1879년에 플라즈마를 물질의 제 4 상태라고 정의하였다. 플라즈마 속에는 전기적으로 중성인 원자들로 이루어진 고온 기체와는 달리 전자와 양이온이 섞여 존재하며, 전체적으로는 전하를 띠지 않지만 국소적으로 전자와 양이온과 사이의 전하 분리에 의해 전기장이 발생하고, 그리고 전하의 흐름에 의해 전류와 자기장이 발생하게 된다. 지상에서 자연적으로 발생하는 플

라즈마에는 오로라와 번개가 있으며(The Kor. Ins. of Sur. Eng., 2007; Kim과 Park, 2012), 네온사인은 플라즈마의 원리를 이용한 것으로 네온이나 아르곤 가스를 저압 주입하고 글로 방전(glow discharge)을 이용하여 방전시켜 빛을 내는 방전등(放電燈)이다(Naver, 2015).

플라즈마는 발생 온도와 밀도에 따라 고온, 고밀도 영역의 핵융합 플라즈마, 저온 영역의 응용 플라즈마, 저밀도 영역의 우주 플라즈마 등으로 분류할 수 있다. 핵융합 플라즈마는 온도가 섭씨 일억도 내외인 고온 플라즈마

Received 16 March, 2015; Revised 8 May, 2015;

Accepted 18 May, 2015

\*Corresponding author : Young-Seek Park, Division of Creative Integrater General Studies, Daegu University, Gyeongbuk 712-714, Korea

Phone: +82-53-850-4571

E-mail: ysparkk@daegu.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

이며, 저온 플라즈마는 섭씨 수천-수만도 정도로 이온화되지 않은 중성의 원자나 분자가 섞여 부분 전리된 상태로 있어서, 이들 입자가 국소 열평형(local thermal equilibrium)을 이루고 있는 열 플라즈마(thermal plasma)와 실온 부근의 온도에서 비평형(non-equilibrium) 상태의 적은 열용량을 가지고 있는 저온 플라즈마(cold plasma)로 다시 나눌 수 있다(The Kor. Ins. of Sur. Eng., 2007; Kim과 Park, 2013a).

저온 플라즈마 공정에서 사용되는 주파수에 따라 플라즈마 종류는 MF(medium frequency), microwave 및 RF(radio frequency) 플라즈마로 나뉜다. MF 혹은 RF 플라즈마를 유전체장벽 방전 플라즈마(DBD, dielectric barrier discharge plasma)라고 부른다(Kim과 Hong, 2004). 전극 사이에 유전체를 삽입하여 상온에서 플라즈마를 발생시키는 유전체장벽 방전 플라즈마는 저온 플라즈마 공정 중의 하나이며, 표면 코팅, 반도체 식각, 표면 세정 등에 산업적으로 많이 이용되고 있는 공정으로, 환경 영역에서는 유해가스 처리 등의 대기환경 분야에서 많이 이용되어 왔다(Kim과 Song, 2004).

수 표면이나 수중에서 플라즈마를 발생시키는 수중 플라즈마 공정은 최근에 연구가 시작되고 있는 공정으로 주로 유전체장벽 플라즈마 장치를 이용하여 반응기를 직접 물에 접촉시켜 플라즈마를 발생시킬 수 있기 때문에 반응기의 열화가 방지되고 수 표면이나 수중에서 강한 전계를 형성하여 효율적으로 에너지를 전달할 수 있는 장점이 있다(Jung, 2009). 수중 또는 수 표면에서 고전압 방전이 일어나면 다양한 물리·화학적 공정들이 발생하는데, 방전이 시작될 때 자외선이 조사되고, 라디칼과 산화제와 같은 다양한 화학적 활성종들이 생성된다(Lukes 등, 2004). 수중 플라즈마 방전을 활용하면 기상에서 생성된 각종 화학적 산화제들이 물에 용해되어 오염물질과 직접 접촉되어 반응의 효율성과 에너지 효율성을 동시에 얻을 수 있다(Muhammad 등, 2001). 선행 연구에서 유전체장벽 방전 플라즈마의 경우 조사되는 자외선 중 산화력이 가장 강한 UV-C는 거의 검출되지 않았으며, UV-B와 UV-A도 약하게 검출되어 유전체 장벽 방전의 주요 오염물질 제거 기작은 산화제로 알려졌다(Kim과 Park, 2011). 특히 유전체장벽 방전 플라즈마는 오존 발생장치와 원리가 같기 때문에 플라즈마 반응에서 발생하는 플라즈마 가스의 대부분은 오존이므로 이들 가스의

용존을 높이는 것이 산화제의 용존율을 높여 수중의 오염물질 제거능력을 높일 수 있다(Chung 등, 2004). 일반적으로 오존 발생장치나 플라즈마 장치의 경우 발생한 오존이나 가스를 수중에 용존시키기 위하여 산기장치(sparger)를 이용한다(Bin, 2004; Qiu 등, 2001). 그러나 오존과 같이 플라즈마 반응에서 발생하는 가스의 경우 용존율이 낮기 때문에 용존율을 높이기 위하여 기포탑(bubble columns), 완전혼합 반응기(stirred tanks), 충전탑(packed columns) 및 진동격벽 반응기(oscillatory baffled reactors, OBR's)와 같이 반응기의 구조를 변경하여 용존율을 높이려는 연구가 진행되고 있다(Al-Abduly 등, 2014; Farines, 등, 2003). Lee 등(2010)은 오존의 용존을 높이기 위하여 오존 발생기에서 발생한 오존을 기압탱크를 이용하여 분사시키는 방법을 이용하고 있다. Yang과 Park(2011)은 수중의 용존산소를 높이기 위하여 기존 산기 장치 대신 이젝터(ejector)를 이용하여 산소전달을 향상시키는데 이용하였다.

본 연구는 플라즈마 가스의 용존율을 높여 처리성을 증가시키기 위하여 이젝터 유형의 기-액 혼합장치를 이용하여 가스의 용존을 향상을 꾀하였으나 효과가 크지 않아 다른 형태의 기-액 혼합 장치를 이용하고 용존율을 향상시키고자 하였다. 다양한 형태의 노즐을 이용하여 플라즈마 가스와 물의 혼합에 의한 산화제 용존 성능을 총괄 산소전달계수 측정이라는 간접적 방법으로 평가한 후 최적의 노즐을 찾고 3구 노즐에 대한 운전인자의 영향에 대하여 고찰하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 실험재료 및 실험방법

플라즈마 반응에서 생성되어 수처리에 이용되는 산화제는 수중에 용존되는 산화제인데, 이를 평가하기 위해서는 용존되는 산화제 농도를 직접 측정하여 평가하여야 한다. 이를 위해 시간과 경비가 많이 소요되는 수중에서 산화제의 용존 농도를 측정하는 대신 새로운 방법으로 실시간 측정이 가능하고 간단한 수중 용존 산소의 총괄 산소전달계수를 측정하여 간접적으로 평가하였다. 즉, 수중에서 산소를 없앤 상태에서 공기를 산기시킬 때 산소의 용존율이 높으면, 총괄 산소전달계수가 높다. 수중에서 플라즈마 가스가 용존되어 산화제 농도가 증가하는

현상이 용존산소의 용존과 유사하다고 판단되어 산기관과 노즐과 같은 다른 용존 기구의 총괄 산소전달계수를 비교하여 산소의 용존율 향상을 비교하였다.

Fig. 1에 산소의 용존율을 향상시키기 위한 노즐의 성능을 평가하기 위한  $K_{La}$  측정용 실험장치를 나타내었다. 반응기의 반응 부피는 8 L이었다. 온도 변화에 따라 포화 용존산소 농도가 변하기 때문에 온도를 일정하게 유지하기 위해 임의로 수온 18°C를 기준으로 잡고 항온수조를 이용하여 반응기 속의 수온을 18°C로 일정하게 유지하였다. 실험을 실시하기 전 질소 가스통에서 산기관을 이용하여 질소를 산기시켜 수중의 용존산소 농도를 0.3 mg/L까지 감소시킨 후 공기펌프와 로타미터를 이용하여 일정 유량의 공기를 노즐 앞의 Y자형 분기관 한쪽 측면에 유입시켰다. 액체순환은 반응기 내의 물을 diaphragm 펌프(Shurflo, 2088-592-094)를 이용하여 Y자형 분기관 다른 측면에 유입시켜 공기와 혼합된 물이 3구 노즐이나 다른 노즐로 유입된 후 기-액 혼합 유체가 외부로 분출되도록 하였다.

Fig. 2에 실험에 사용한 4 종류 노즐의 정면도(A)와 배면도(B)를 나타내었다. Fig. 2 (A)에 나타내었듯이 첫 번째 노즐은 3구 노즐(a)로써 기-액 혼합 유체가 3군데의 지름 1 mm이하 분출구를 통하여 배출된다. (b)는 분출구 형태가 원형이고 내경이 3 mm인 원형 노즐, (c)는 분출구 형태가 원형이고 내경이 1.5 mm인 원형 노즐, (d)는 단 직경이 1 mm, 장 직경이 2.5 mm인 타원형 노즐이다. Fig. 2(B)에 각 노즐의 배면도를 나타내었다. (e)의 3구-노즐은 공기와 물이 메시 유형의 망을 통과하면서 혼

합되어 분출구로 분출된다. (f)와 (g)의 원형 노즐은 노즐 내부에 나선형 흐름을 유도하는 날개가 장착되어 있으며, (h)의 타원형 노즐은 빈 공간으로 구성되어 있다.

2.2. 분석 및 측정방법

반응기 하부에 설치된 DO probe를 통하여 DO meter (WTW, multi-3410)에서 용존산소 농도를 측정하여  $K_{La}$ 를 계산하였다.  $K_{La}$ 는 식 1과 같이 계산하였다.

$$dC_L/dt = K_{La}(C_s - C_L) \tag{1}$$

여기서,  $C_s$  : 포화 용존 산소 농도 (mg/L)

$C_L$  : 수중의 산소 농도 (mg/L)

$K_{La}$  : 총괄 산소전달계수 ( $\text{min}^{-1}$ )

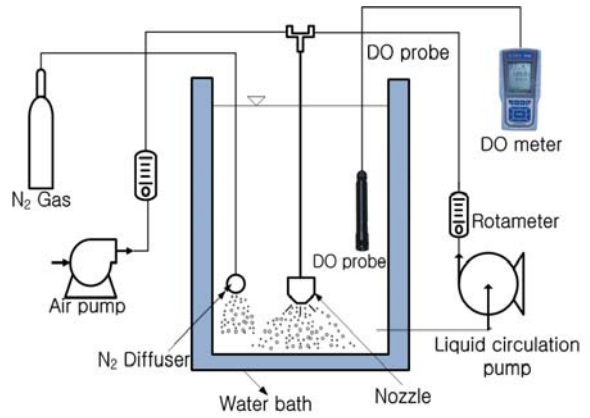


Fig. 1. Schematic diagram of  $K_{La}$  measuring system.



(a) 3-prong, (b) circular(3 mm), (c) circular(1.5 mm) (d) ellipse  
(A) Front view



(e) 3-prong, (f) circular(3 mm), (g) circular(1.5 mm) (h) ellipse  
(B) Rear view

Fig. 2. Photographs of nozzle.

3. 결과 및 고찰

3.1. 노즐 종류에 따른  $K_{La}$

Fig. 3에 원형 노즐(내경 1.5 mm)을 이용한  $K_{La}$  실험에서 시간에 따른 수중의 용존 산소 농도 변화와 18℃에서 포화산소 농도와 수중의 용존산소 농도 차이의 자연대수 값인  $\ln(C_s - C_L)$ 를 나타내었다.  $\ln(C_s - C_L)$  자료에서 추세선을 구한 후 기울기 값에서  $K_{La}$  값을 구하였다.

3구 노즐은 안개를 분무하는 노즐로 물과 연결하여 대기 중에서 물을 미세한 안개처럼 분무하는 역할을 한다. 물이 미세하게 분무되기 때문에 가스를 공급하면 기-액 접촉이 높아  $K_{La}$  값이 증가될 것으로 예상하여 공기와 물을 같이 공급하여 노즐 내에서 혼합시켜 수중에 배출시켰다. 3구 노즐이 플라즈마 반응에서 발생하는 가스의 용존을 상승에 적용 가능한지 평가하기 위하여 일반적인 수중 플라즈마 공정에서 이용하는 산기관을 이용한  $K_{La}$  값을 비교하였다.

산기관을 이용한 경우 공기공급 유량을 1 L/min으로 유지한 조건에서 수심 -13 cm 지점에서 용존산소 농도를 측정하고  $K_{La}$  값을 구한 결과  $K_{La}$ 는 0.18 1/min로 나타났다. 반면 3구 노즐을 이용한 경우 공기공급 유량 1 L/min, 액체순환 유량 1.5 L/min의 경우  $K_{La}$  값은 0.48 1/min로 나타나 2.67배 더 높은 것으로 나타났다.

3구 노즐을 이용한 기-액 혼합장치가 기존 산기관보다 산소의 용존 농도가 2.67배 높아졌기 때문에 플라즈마 반응에서 발생하는 산화제는 기존 산기관을 이용한 가스 배출장치보다 산화제의 용존에 효과적일 것이라고

판단되었다.

3구 노즐과 다른 종류의 노즐의 성능을 비교하기 위하여 총 4종류의 노즐[3구 노즐(분출 직경 1 mm이하), 원형 노즐(내경 1.5 mm, 3 mm), 타원형 노즐(단 직경 1 mm, 장 직경 2.5 mm)]에서 노즐 종류별  $K_{La}$  값을 Fig. 4에 나타내었다. 이때 각 노즐에 공급되는 공기공급 유량은 1 L/min, 액체공급 유량은 1.5 L/min이었다. 3구 노즐은 Y자 분기관에서 공기와 물이 접촉한 후 3구 노즐에서 퍼져서 지름이 1 mm이하인 작은 구멍 3개로 배출되며, 다른 노즐은 Y자형 분기관을 통해 공기와 물이 유입된 후 노즐에서 혼합된 후 하나의 노즐 구멍을 통하여 배출된다.

Fig. 4에서 보듯이  $K_{La}$ 가 높은 순서는 3구 노즐(Fog-3) > 원형 노즐 1.5 mm(ID-1.5 mm) > 타원형 노즐(단 직경 1 mm, 장 직경 2.5 mm)(Ellp-2.5 mm) > 원형 노즐 3 mm(ID-3 mm)로 나타났다. 3구 노즐의  $K_{La}$  값이 가장 높게 나타났으며, 공기와 물의 혼합 유체가 최종 배출되는 구멍이 적을수록  $K_{La}$  값이 높은 것으로 나타났다. 이런 경향은 지름이 1.5 mm(원 면적 1.77 mm<sup>2</sup>)인 원형 노즐과 3 mm(원 면적 7.07 mm<sup>2</sup>)인 원형 노즐에서 확실하게 나타났으며, 평균 직경이 1.5 mm인 원형 노즐과 3 mm 원형 노즐 중간인 타원형 (대략적인 타원 면적 4.71 mm<sup>2</sup>) 노즐의  $K_{La}$  값도 중간인 것으로 나타났다. 일반 플라즈마 공정에서 사용하는 산기관의 경우 공기만 배출하기 때문에 공기 배출을 위한 압력이 필요하지 않지만 노즐의 경우 물과 공기가 같이 혼합되어 작은 배출구를 통해 같이 배출하여야하기 때문에 압력이 필요한 것으로

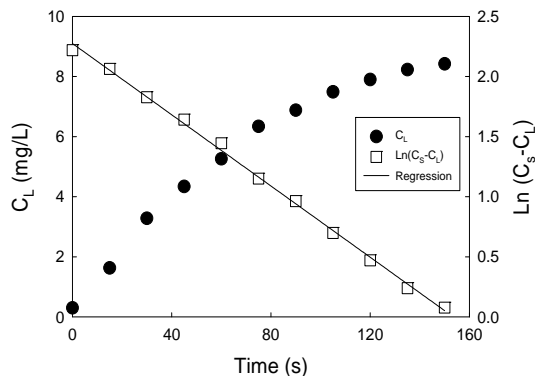


Fig. 3. Variation of  $C_L$  and  $\ln(C_s - C_L)$  with time of round type nozzle(ID-1.5 mm).

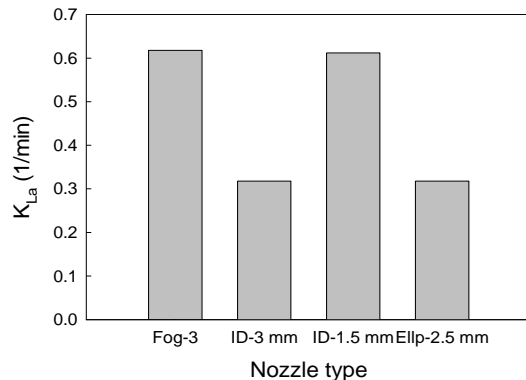


Fig. 4.  $K_{La}$  with different nozzle type.

나타났다.

### 3.2. 3구 노즐과 산기관 위치 수면 아래 깊이에 따른 $K_{La}$ 변화

플라즈마에서 발생하는 가스의 용존은 기체의 용존이므로 가스 배출장치의 위치에 따라 용존율이 달라질 것으로 예측된다.  $K_{La}$  값도 산소의 용존과 관계되므로 공기공급 유량이 1 L/min, 액체순환 유량이 1.5 L/min에서의 노즐의 위치에 따른  $K_{La}$  값을 Fig. 5(a)에 나타내었다. 수 표면 상부 2 cm 지점은 수 표면 위에서 안개 3구 노즐에서 공기-물 혼합 유체를 수면으로 분출시킬 때 수중의  $K_{La}$ 를 의미한다. 수 표면 위에서의  $K_{La}$  값은 0.216 1/min로 나타나 일반 산기관을 이용한 경우의  $K_{La}$ 와 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 수 표면의 경우  $K_{La}$  값은 0.23 1/min로 나타났으며, 3구 노즐의 위치를 수면 아래

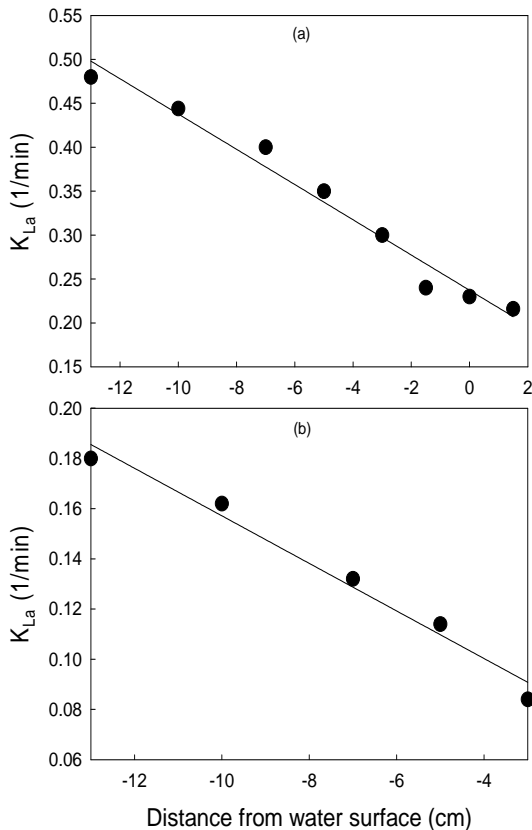


Fig. 5. Variation of  $K_{La}$  with dissolving device location from water surface. (a) nozzle, (b) diffuser

로 내릴수록  $K_{La}$  값은 증가하여 -13 cm 지점에서 0.48 1/min로 나타나 노즐의 위치가  $K_{La}$  값에 매우 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한 노즐의 위치에 따른  $K_{La}$  값은 거의 직선적인 관계를 나타내었고, 직선 관계식으로 표현한 결과  $R^2 = 0.9738$ 으로 나타났다. 반응기 깊이의 한계 때문에 -13 cm이하에서는 실험이 이루어지지 않았으며 플라즈마 반응기의 설계시 플라즈마 반응기를 좁게 하여 가스 배출장치의 위치를 낮게 하는 것이 유리하다고 판단되었다.

Fig. 5(b)에 공기공급 유량이 1 L/min인 조건에서 산기관의 위치에 따른 일반 산기관에서의  $K_{La}$  값을 나타내었다. 산기관의 경우 수 표면에서의 실험은 의미가 없기 때문에 수행하지 않았으며, 수면 아래 -3 cm 지점에서  $K_{La}$ 는 0.08 1/min로 나타났다. 노즐의 깊이가 깊어짐에 따라  $K_{La}$  값이 증가하였으며, -13 cm에서  $K_{La}$ 는 0.18 1/min로 나타났다. 산기관에서 수면 아래 깊이에 따른  $K_{La}$  값의 경향은 3구 노즐과 같이 직선관계를 나타내었으며,  $R^2 = 0.9776$ 으로 나타났다.

### 3.3. 액체순환 유량에 따른 $K_{La}$ 변화

3구 노즐의 경우 각각 Y자 분기관을 통해 유입된 공기와 물이 노즐 내부에서 혼합된 후 3개의 작은 노즐을 통하여 혼합 유체가 수중으로 배출되며 수중에서 물과 혼합되어 수중의 용존산소 농도를 높이는 역할을 한다. 액체순환 펌프에 의해 순환되는 물은 공기와 혼합되어 공기 중 산소의 용존을 높이는 역할 뿐만 아니라 노즐을 통해 배출될 때 유량이 많아 수압이 높을수록 반응기 내부로 분출될 때 혼합속도를 높하게 된다.

Fig. 6에 공기공급 유량을 1 L/min, 3구 노즐의 위치를 -13 cm로 유지한 조건에서 액체순환 유량에 따른  $K_{La}$  값을 나타내었다.  $K_{La}$  값은 액체순환 유량이 0.8 L/min이하에서는 액체가 순환하지 않았다. 3구 노즐은 공기와 물이 동시에 노즐로 유입되는데, 물이나 공기가 배출되지 않는 현상이 발생하여 액체순환 유량과 공기공급 유량을 변화시켜 물과 공기가 배출되는 현상을 관찰하였다. 관찰한 결과 어느 한 쪽의 유량이나 압력이 높고 어느 한 쪽의 유량이나 압력이 낮을 경우 다른 쪽의 유체가 노즐로 유입되지 못하여 공기나 물 단독 흐름밖에 발생하지 않는 것으로 판단되었다. 공기 공급 유량이 1 L/min인 조건에서는 액체순환 유량이 0.6~0.8 L/min 범

위에서도 물은 흐르지만 정상적인 물의 흐름은 0.8 L/min부터 시작되는 것으로 관찰되었다. 액체순환 유량이 0.8 L/min에서  $K_{La}$  값은 0.108 1/min로 나타났으며, 액체순환 유량이 1.4 L/min에 이르기까지  $K_{La}$  값이 빠르게 증가하여 1.4 L/min에서는 0.474 1/min이었으며, 1.7 L/min에서 최대  $K_{La}$  값인 0.510 1/min에 도달된 후 2.0 L/min에서는  $K_{La}$  값이 0.390 1/min로 낮아졌다. 액체순환 유량이 증가하면 3구 노즐로 일정량의 공기가 유입될 때 공기 중의 산소와 빠르게 혼합되어 3구 노즐에서 산소가 빠르게 용해되어 총괄 산소전달속도가 증가한다. 또한 수중에 분출될 때 물의 흐름을 유도하여 반응기 내의 물이 혼합되면서 2차 용존을 유발한다. 액체순환 유량이 2 L/min인 경우 공기공급 유량과의 비가 2배로 높아 다량이 물이 노즐에서 공기와 빨리 접촉하지만 공기 중의 산소가 미처 용존되기 전에 빠르게 노즐을 통과할 수 있다. 또한 노즐에서 배출되는 공기 기포는 서서히 상승하는 것이 산소의 용존에 도움이 되지만 물의 유속으로 인해 대기 중으로 빠르게 상승하기 때문에 액체순환 유량이 오히려 산소의 용존에 방해로 하고 이로 인해 최적의 액체순환 유량이 존재하는 것으로 판단되었다. 최적의 공기공급 유량과 액체순환 유량에 대한 최적 비율은 향후 정밀하게 결정하여야 할 것으로 판단되었다.

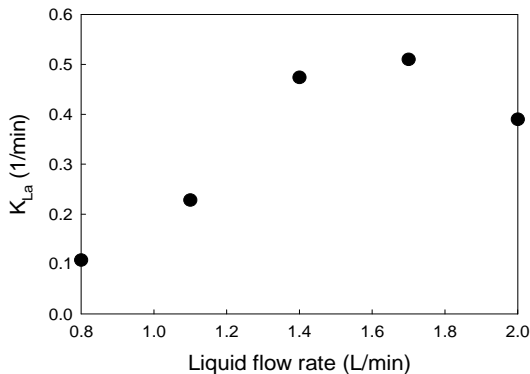


Fig. 6. Variation of  $K_{La}$  with liquid flow rate.

### 3.4. 공기공급 유량에 따른 $K_{La}$ 변화

액체순환 유량을 1.7 L/min, 3구 노즐의 위치를 수 표면에서 - 13 cm 지점에 놓은 후 공기공급유량 변화에 따른  $K_{La}$  값 변화를 Fig. 7에 나타내었다.

공기공급 유량이 1.0 L/min에서  $K_{La}$  값은 0.50 1/min

이었으며, 공기공급 유량이 증가함에 따라 선형적으로 증가하였다. 공기공급 유량의 증가에 따른  $K_{La}$  값은 식 (2)와 같이 지수형태로 나타났으며,  $R^2 = 0.9645$ 로 높은 상관관계를 나타내었다.

$$K_{La} = 0.3581e^{0.2919 * \text{air flow rate}} \quad (2)$$

액체순환 유량 1.7 L/min에서 최대  $K_{La}$  값을 얻을 수 있는 최적 공기공급 유량은 3.5 L/min으로 나타났다. 최대 공기공급 유량 대 액체순환 유량은 본 실험조건에서는 대략 2 : 1인 것으로 나타났다.  $K_{La}$  값에 대한 액체순환 유량과 공기공급 유량의 경향이 다른 것은 액체순환 유량은  $K_{La}$  값을 높이는 직접적인 인자는 아니며 공기 중의 산소가 물에 잘 용존되게 하고, 물의 흐름을 유발하는 보조적인 역할을 한다. 반면 공급되는 공기 중의 산소가 물에 용존되기 때문에 공기공급 유량이 증가하면  $K_{La}$  값이 증가에 직접 영향을 미치며, 공기공급 유량에 따른  $K_{La}$  증가는 직선보다는 직선에 가까운 지수 형태로 나타났다.

공기공급 유량을 3.5 L/min까지만 실험한 것은 액체순환 유량이 1.7 L/min에서 공기 펌프에서 얻을 수 있는 최대 공기공급 유량이었다. 공기 펌프의 공기공급 유량은 일반 산기관을 이용하는 경우 펌프의 재원상 10 L/min까지 공급이 가능하지만 3구 노즐에 연결하여 물과 동시에 공급할 때 액체순환 유량이 1.7 L/min인 경우 최대 공기공급 유량은 3.5 L/min으로 감소하였다. 이는 3구 노즐에서 빠져나가는 물과 공기의 통로가 1 mm 이하로 매우 좁아 3구 노즐로의 액체의 유입이 공기 공급을 방해하기 때문에 공기 펌프의 최대 유량보다 낮은 공기공급 유량이 공급되는 것으로 판단되었다.

일반적으로 플라즈마 반응을 위해 공기나 산소를 공급하는 경우 가스 공급량을 증가시킬 때 용존되는 산화제 농도가 증가하다 일정 가스 유량 이상에서는 용존 산화제 농도가 더 이상 증가하지 않는 최적 가스 유량이 존재하는 것으로 알려져 있다(Kim과 Park, 2013b; Kim과 Park, 2014). 이는 일정 전력에서 저 유량의 가스를 공급할 때 수중에서 플라즈마 반응에 의한 고농도의 산화제가 발생되어 용존되며, 가스의 유량이 증가하면 저농도의 산화제가 발생되어 용존된다. 저 유량, 고농도의 플라

즈마 가스가 수중에 용존될 때 용존되는 총 산화제 농도가 낮고, 가스 유량이 증가되면서 용존되는 산화제의 농도가 증가된다. 그러나 일정 유량 이상에서는 용존되는 가스 양은 많지만 저농도이므로 용존에 대한 구동력 (driving force)이 약하고 다량의 가스 발생으로 인해 상승속도가 증가하여 산소의 용존시간이 감소하기 때문에 산화제 용존에 대한 평형이 이루어져 최적의 가스 유량이 존재한다고 판단된다.

일반 산기관을 이용하는 경우 플라즈마 반응에서 생성되는 산화제 농도에 대한 최적 가스 공급량은 액체와 가스를 동시에 공급하는 본 연구에서는 나타나지 않았다. 본 연구에서는 공기를 공급 가스로 이용하는 경우의 최적 공기공급 유량인 4 L/min(Park과 Kim, 2011) 보다 낮은 3.5 L/min에서 공기가 공급되었고, 3구 노즐 내부에서 강제적으로 물과 혼합되고 미세한 3구 노즐을 통해 배출되기 때문에 산소의 용존율이 높아,  $K_{La}$  값이 높으며, 일반적인 산기관을 이용한 플라즈마 가스의 용존에서 발생되는 현상과는 다른 현상이 나타난다고 판단되었다. 최적 공기 공급량에 대한 실험은 향후 본 연구에서 실험한 장치보다 좀 더 많은 유량을 공급할 수 있는 액체순환 펌프와 공기공급 펌프를 이용하여 실험하여야 할 것으로 판단되었다.

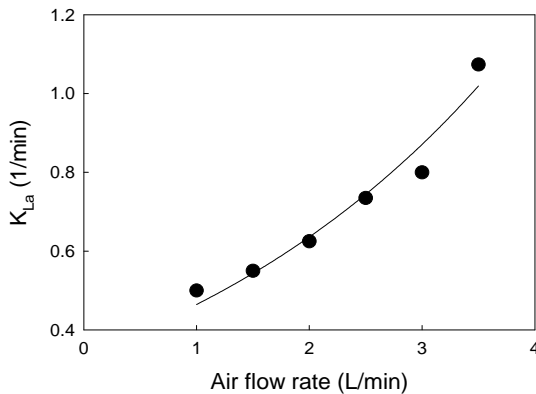


Fig. 7. Variation of  $K_{La}$  with air flow rate.

#### 4. 결론

본 연구는 플라즈마 반응기의 성능을 향상시키기 위한 기초 연구로서 산화제의 용존 농도를 측정하지 않고

안개 발생을 위한 3구 노즐에 공기와 물을 같이 유입시켜 분출하였을 때의 용존 성능을 측정이 간편한  $K_{La}$ 를 측정하여 간접적으로 평가하여 다음의 결과를 얻었다.

1) 기존 플라즈마 반응에서 발생한 플라즈마 가스의 수중 배출을 위한 일반 산기관의  $K_{La}$ 값은 0.18 1/min로 나타났고 같은 실험 조건에서 안개 3구 노즐을 이용한 경우  $K_{La}$  값은 0.48 1/min으로 나타나 2.67배가 더 높은 것으로 나타났다.

2) 노즐 종류별  $K_{La}$  값의 순서는 안개 3구 노즐 (내경 1 mm이하) > 원형 노즐(내경 1.5 mm) > 타원형 노즐 (단 직경 1 mm, 장 직경 2.5 mm) > 원형 노즐(내경 3 mm)로 나타났다.

3) 3구 노즐과 일반 산기관의 위치를 수면 아래로 내릴수록  $K_{La}$  값은 증가하여 반응기 바닥 층인 -13 cm 지점에서 가장 높은  $K_{La}$  값을 나타내었으며, 두 경우 모두 수면 아래 깊이에 따른  $K_{La}$  값의 경향은 직선관계를 나타내었다.

4) 액체순환 유량이 1.7 L/min에서 최대  $K_{La}$  값인 0.510 1/min에 도달된 후 2.0 L/min에서는  $K_{La}$  값이 0.390 1/min로 낮아져 최적 액체순환 유량이 존재하였다.

5) 최적 액체순환 유량에서 공기공급 유량이 증가함에 따라 선형적으로 증가하였다. 공기공급 유량의 증가에 따른  $K_{La}$  값은 지수형태로 나타났으며, 액체순환 유량과는 다르게 최적 공기공급 유량은 나타나지 않았다.

#### 감사의 글

본 연구는 2014년도 대구대학교 교내연구비의 지원을 받아 진행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### REFERENCE

- Al-Abduly, A., Christensen, P., Harvey, A., Zahng, K., 2014, Characterization and optimization of an oscillatory baffled reactor(OBR) for ozone-water mass transfer, Chem. Eng. Proces., 84, 82-89.
- Bin, A. K., 2004, Ozone dissolution in aqueous systems treatment of the experimental data, Exp. Ther. Fluid Sci., 28, 395-405.
- Chung, J. W., Lee, H. D., Lee, Y. H., Jun, G. I., Kim, H. K., Cho, M. H., 2004, Ozone generation characteristics

- of silent discharge process, *J. of Kor. Soc. Environ. Eng.*, 26(3), 305-312.
- Farines, V., Baig, S., Albet, J., Molinier, J., Legay, C., 2003, Ozone transfer from gas to water in a co-current upflow packed bed reactor containing silica gel, *Chem. Eng. J.*, 91, 67-73.
- Jung, J. K., 2009, Generation apparatus and method on the water plasma torch with high-density, Korean Patent, 10-0924649.
- Kim D. S., Park, Y. S., 2013a, Development of multi dielectric barrier discharge plasma reactor for water treatment, *J. of Environ. Sci. Int.*, 22(7), 863-871.
- Kim D. S., Park, Y. S., 2013b, A study for oxidants generation on oxygen-plasma discharging process discharging system, *J. of Environ. Sci. Int.*, 22(12), 1561-1569.
- Kim, D. S., Park, Y. S., 2011, Removal of Rhodamine B dye using a water plasma process, *J. Environ. Health Sci.*, 37(3), 218-225.
- Kim, D. S., Park, Y. S., 2012, Development of plasma reactor of dielectric barrier discharge for water treatment, *J. of Environ. Sci. Int.*, 21(5), 597-603.
- Kim, D. S., Park, Y. S., 2014, Study on the generation of chemically active species using air-plasma discharging system, *J. Kor. Soc. on Wat. Environ.*, 30(4), 394-402.
- Kim, H. S., Song, S. J., 2004, Surface treatment technology using low-temperature /atmospheric-pressure plasma, *Trends in Met. & Mat. Eng.*, 17(4), 21-27.
- Kim, H. S., Hong, S. J., 2004, Low temperature/atmospheric pressure plasma surface treatment technology, *Mat. Yard*, 17(4), 21-27.
- Lee, S. H., Jung, K. J., Kwon, J. H., Lee, S. H., 2010, A study on the solubilisation of excess sludge using microbubble ozone, *J. of Kor. Soc. Environ. Eng.*, 32(4), 325-332.
- Lukes, P., Appleton, T., Locke, B. R., 2004, Hydrogen peroxide and ozone formation in hybrid gas-liquid electrical discharge reactors, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 40, 60-67.
- Muhammad, A. M., Abdul, G., Salman, A. M., 2001, Water purification by electrical discharges, *Plasma Sci. and Tech.*, 10, 82-91.
- Naver, 2015, <http://terms.naver.com/entry.nhn?docId=269540&cid=42641&categoryId=42641>.
- Park, Y. S., Kim, D. S., 2011, Degradation of N,N-Dimethyl-4-nitrosoaniline (RNO) using air plasma process, *The Kor. Environ. Sci. Soc. 2011 Annual Conf. Proceedings*, 20, 388-390.
- Qiu, Y., Kuo, C. H., Zappi, M. E., 2001, Performance and simulation of ozone absorption and reactions in a stirred-tank reactor, *Environ. Sci. Technol.*, 35(1), 209-215.
- The Korean Institute of Surface Engineering, 2007, Outline of plasma technology and its industrial application, *Trends of Metals & Materials Engineering*, 20(4), 4-19.
- Yang, H. C., Park, S. K., 2011, Effect of salinity on dissolved oxygen characteristics in an ejector-aerator, *J. of Kor. Soc. Mar. Eng.*, 35(5), 640-646.