

무성방전식 오존발생기의 운영비 산정을 위한 프로그램 개발

유정호, 이 경, 심성현, 이경혁
K-water

Program development for calculating the operating costs of silent discharge ozone generator

Jung-Ho You, Gyung Lee, Hyeon-Sung Shim, Gyung-Hyeok Lee
Korea Water Resource Corporation

Abstract - 오존은 수처리공정에서 사용되고 있는 산화제중에서 염소 다음으로 가장 강력한 산화력을 가지고 있는 물질이다. 그에 따라 상·하수도, 축산폐수, 농약등 오염원을 효과적으로 제거하는데 활용이 확대되고 있는 추세이다. 또한 2차적인 오염물질이 없다는 점에서 더욱 다양한 분야에서 적용되고 있다.

현재 오존을 발생시키기 위해 다양한 기술이 개발되고 있으며, 그 중에서 1857년 Siemens에 의해 개발된 무성방전식 오존발생기가 최근 가장 널리 사용되고 있다.

본 연구에서는 무성방전식 오존발생기에 대한 최적 운전점을 도출하기 위한 시뮬레이션을 JAVA로 프로그래밍하고 실제 운영현장에 적용하여 결과를 도출하였다.

1. 서 론

오존은 1839년 물의 전기분해를 연구하던 Schonbein에 의해 발견되었으며, 1857년 Werner von Siemens가 가스의 방전에 의해 오존을 발생시킨 후 현재까지 꾸준히 개발되어 이용되고 있다.

최초 개발된 오존발생기는 가스방전을 이용한 것으로 근대의 상업용 오존발생기의 주축이 되는 무성방전식 오존발생기의 원리와 동일하다.

오존(ozone, 분자식: O₃)은 산소 원자 3개로 이루어져 있으며, 상온 대기압에서 푸른빛의 기체이다. 영하 112도 이하에서는 검푸른 액체이며, 영하 193도 이하로 내려가면 고체가 된다. 오존은 불안정하여 이원자의 산소로 분해되려는 경향이 있는데, 이러한 경향은 온도가 올라갈수록, 압력이 낮아질수록 강하다. 오존이 갖고 있는 강력한 산화력은 하수의 살균, 악취제거 등에 유용하게 이용되기도 하고, 지구 대기중에 오존층을 형성하여 보호막의 역할도 하는 등 좋은 역할을 하지만, 지표면에 생성되는 오존은 인간의 건강에 해로운 대기오염 물질이 된다.

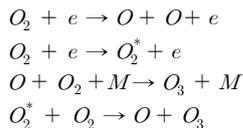
오존발생방법으로는 무성방전법, 전해법, 광화학법, 자외선법등 물리적·화학적 방법이 사용되고 있으며, 최근 오존발생에 있어서 고효율, 대용량 및 발생기의 소형화를 통해 산업적인 경제성을 확보하여 폭넓은 분야에서 다양하게 사용되고 있다.

본 논문에서는 수처리공정에서 사용되고 있는 무성방전식 오존발생기의 오존 농도별 효율을 측정하고 그 결과를 바탕으로 운전비 산정 프로그램을 개발하여 운영효율을 평가하였다.

2. 본 론

2.1 무성방전식 오존발생기의 발생원리

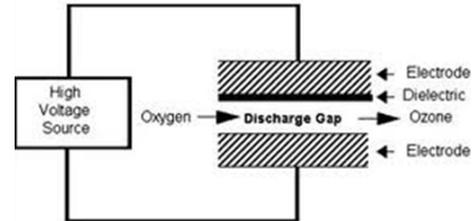
고농도, 고효율의 오존을 발생시키기 위해서 주로 사용되는 무성방전형 오존발생장치는 전극 사이에 유리나 세라믹의 유전체를 삽입하고 공기나 산소를 주입하고 고전압을 인가하여 유전체장벽에 축적된 전하에 의한 마이크로 방전을 통해 오존을 발생시키는 원리이다. 이때 방전영역에서는 다음과 같은 반응에 의해 오존이 발생된다.



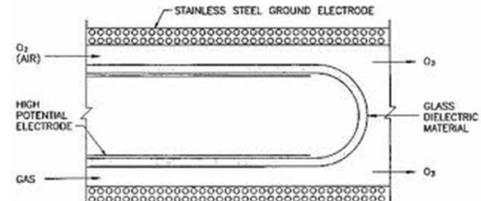
여기서 e: 전자 O: 산소원자, O₂: 기저상태의 산소분자
O₃: 오존, M: 제3분체(O, O₂, O₃), O₂^{*}: 여기 산소분자

2.2 무성방전식 오존발생기의 구조

무성방전형 오존발생기의 기본 구조는 그림1과 같은 평판형 오존발생기의 구조를 가지고 있다. 최근에는 그림2와 같이 동축 원통형 오존발생 전극이 주로 사용되고 있다.



<그림 1> 평판형 오존발생전극



<그림 2> 동축 원통형 오존발생전극

2.3 프로그램 개발

오존발생기의 최적 운영점은 오존 운영비가 최소인 발생농도를 선정하는 의미를 가지고 있으며 그에 따라 농도별 오존발생기의 소비전력을 파악해야 한다. 또한 원료 가스로 액체 산소를 사용할 경우 산소비용도 운영비에 포함되어 제시할 필요가 있다. 이러한 결과를 바탕으로 오존 발생 농도별 전력량 및 산소소비량을 수치해석적 기법을 이용하여 방정식으로 도출하고 프로그래밍하여 최적 운전점을 선정하게 된다.

2.3.1 실험장치의 구성

현장의 M정수장의 오존발생 설비를 대상으로 전력량을 측정하였으며 운영설비의 현황은 표1, 2와 같다.

<표 1> M정수장 오존발생용량

| 구 분 | 시설용량 (m ³ /일) | 오존주입률 (mg/ℓ) | 오존요구량 (kg/hr) | 발생기 용 량 | 비 고 |
|-------|--------------------------|--------------|---------------|--------------|-----|
| 후 오 존 | 96,000 | 3.0(최대) | 12.0 | 12kg/hr × 2대 | |

<표 2> M정수장 공급설비현황

| 기 기 명 | | 사 | 양 | 수 량 | 비 고 |
|-----------------|----------|---|---|---------|-----|
| 액 체 산 소 공 급 설 비 | 산소 탱크 | 형 식 : 수직원통형 압력탱크 규 격 : 26ton × 9.5kg/cm ² | | 1 | |
| | 산소 기화기 | 형 식 : 공냉식 기화기 규 격 : 637Nm ³ /hr × 9.5kg/cm ² | | 1 | |
| | 1차 산소필터 | 형 식 : 카트리리지식 GAS FILTER 규 격 : 400Nm ³ /hr × 2kg/cm ² | | 1 | |
| | 2차 산소필터 | 형 식 : 카트리리지식 GAS FILTER 규 격 : 400Nm ³ /hr × 2kg/cm ² | | 1 | |
| | 오존 발생장치 | 형 식 : TUBE TYPE 수냉식 규 격 : 12kg/hr × 1.5bar | | 2 | |
| | 후오존 산기장치 | 형 식 : 세라믹 DISK TYPE 디퓨저 규 격 : Ø120 (0.3~2.0Nm ³ /hr) | | 32 × 2식 | |
| | 후오존 배출설비 | 형 식 : 열분해식 규 격 : 120Nm ³ /hr × 0.1ppm이하 | | 2 | |

2.3.2 오존발생기의 전력량 측정

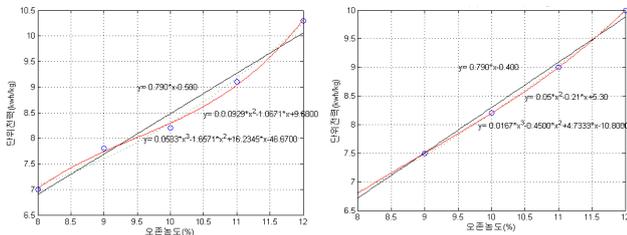
오존발생기의 오존농도별 성능곡선을 도출하기 위해 오존농도 운영 범위에서의 전력량을 측정하였으며 측정값은 표3과 같다.

<표 3> 오존농도별 소비전력 및 산소가스량 측정결과

| 구분 | 오존농도(%) | 8.0 | 9.0 | 10.0 | 11.0 | 12.0 | 비고 |
|------|---------------------------|-------|------|------|-------|-------|----|
| A 호기 | 소비전력(kwh) | 83.8 | 93.2 | 98.9 | 109.1 | 123.2 | |
| | 산소가스량(m ³ /hr) | 100.5 | 89.1 | 80.3 | 73.0 | 68.0 | |
| | 단위소비전력(kwh/kg) | 7.0 | 7.8 | 8.2 | 9.1 | 10.3 | |
| B 호기 | 오존농도(%) | 8.0 | 9.0 | 10.0 | 11.0 | 12.0 | |
| | 소비전력(kwh) | 81.3 | 89.9 | 98.6 | 107.4 | 119.9 | |
| | 산소가스량(m ³ /hr) | 100.5 | 89.1 | 80.3 | 73.0 | 68.0 | |
| | 단위소비전력(kwh/kg) | 6.8 | 7.5 | 8.2 | 9.0 | 10.0 | |

2.3.3 오존농도별 전력소비량 수치해석

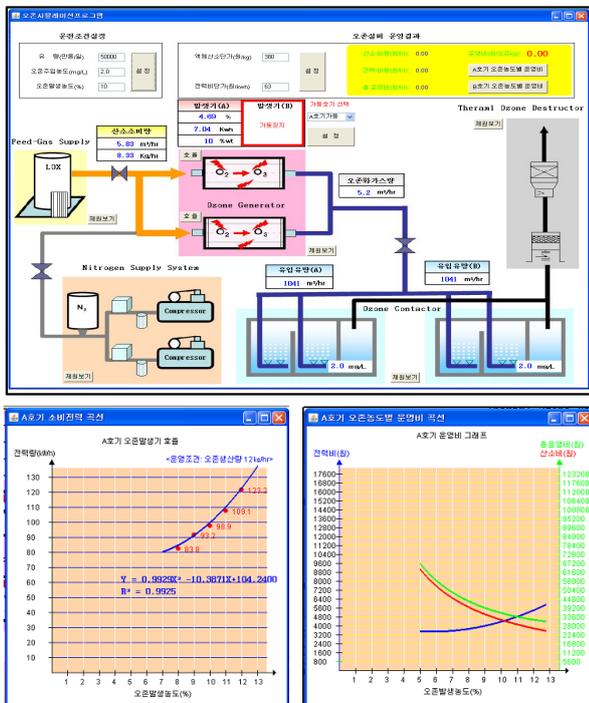
단위전력 값은 오존발생기 발생농도의 운전범위(8~12%)에서 측정된 데이터를 활용하였으며, 수치해석 프로그램(MATLAB)을 이용하여 1~3차 최적함수를 구하고 상관계수 R²가 1에 가까운 함수를 시뮬레이션 프로그램에 적용하였다.



<그림 3> 오존농도별 소비전력 최적함수

2.4 운영비산정 프로그램 구성

운전조건(유량, 오존주입농도, 오존발생농도) 및 운영조건(산소비, 전력비)을 입력변수로 설정하였으며, 출력은 산소비용(원/hr), 전력비용(원/hr), 총운영비(원/hr) 및 운영비(원/오존kg)를 확인할 수 있도록 그림4와 같이 구성하였다.



<그림 4> 운영비산정 프로그램 구성

2.5 실험결과 및 고찰

M정수장에 대한 운영조건(유입유량, 주입농도, 오존 발생량)에 따른 운영비를 프로그램으로 모의 실험한 결과는 표4,5와 그림5와 같다.

2.5.1 운영조건별 시뮬레이션 결과

<표 4> 시뮬레이션 결과

<액체산소단가: 380원/kg, 전력비단가: 63원/kWh>

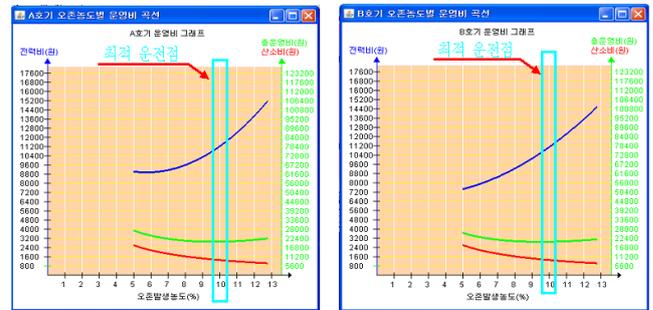
| 운영조건 | | 오존발생기 발생별 운영비(원/hr) | | | | | 비고 |
|------------------------|-------------|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----|
| 유입유량 (m ³) | 주입농도 (mg/ℓ) | 8% | 9% | 10% | 11% | 12% | |
| 24,000 | 1 | 5,196.59 | 4,701.08 | 4,322.84 | 4,033.06 | 3,812.57 | |
| 24,000 | 2 | 10,393.19 | 9,402.17 | 8,645.67 | 8,066.12 | 7,625.14 | |
| 24,000 | 3 | 15,589.78 | 14,103.25 | 12,968.51 | 12,099.19 | 11,437.70 | |
| 48,000 | 1 | 10,393.19 | 9,402.17 | 8,645.67 | 8,066.12 | 7,625.14 | |
| 48,000 | 2 | 20,786.38 | 18,804.34 | 17,291.35 | 16,132.25 | 15,250.27 | |
| 48,000 | 3 | 31,179.57 | 28,206.51 | 25,937.02 | 24,198.37 | 22,875.41 | |

2.5.2 원료비용 변화시 시뮬레이션 결과

<표 5> 시뮬레이션 결과

<액체산소단가: 200원/kg, 전력비단가: 300원/kWh>

| 운영조건 | | 오존발생기 발생별 운영비(원/hr) | | | | | 비고 |
|------------------------|-------------|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----|
| 유입유량 (m ³) | 주입농도 (mg/ℓ) | 8% | 9% | 10% | 11% | 12% | |
| 72,000 | 1 | 13,879.92 | 13,507.57 | 12,469.10 | 13,719.07 | 14,227.16 | |
| 72,000 | 2 | 27,759.84 | 27,015.13 | 26,938.20 | 27,438.13 | 28,454.32 | |
| 72,000 | 3 | 41,639.76 | 40,522.70 | 40,407.30 | 41,157.20 | 42,681.48 | |



<그림 5> 최적운영점 선정

3. 결 론

M정수장 오존발생기에 대한 최적 운영점 선정을 위한 연구를 수행하면서 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 가. 수치해석적 기법을 활용한 오존발생기의 성능곡선은 M정수장의 경우 운전 조건(오존농도 8~12%)에서는 2차, 3차함수가 최적 함수로써 신뢰성을 가지고 있는 것으로 계산되었다. 다만, 운전범위 이외의 데이터에 대한 신뢰성을 고려하면 2차 함수를 성능곡선으로 선정하는 것이 유리하다.
- 나. 오존시뮬레이션 프로그램을 통하여 오존농도별 운영결과에서 고농도로 운전할 수록 운영비 절감이 뛰어난 것으로 평가되었다. 그러나 고농도 운전시 오존 발생기 내부의 온도 상승으로 방전판의 소손 및 오존의 재분해가 우려되므로 최대 발생농도 보다 낮은 10%~11% 범위에서 운전하는 것이 적합하다.
- 다. M정수장은 오존농도별 운영비는 최대 30%(8%→12%) 까지 차이가 있으며, 오존발생기 농도가 증가하면 운영비의 절감율은 감소하는 것으로 평가되었다.
- 라. 현재 전력비단가(63원/kWh)는 액체산소단가(380원/kg)에 비해 6배정도 낮기 때문에 최대 오존발생 농도에서 최적 운전점이 선정되었다. 향후, 액체산소 단가 및 전력비 단가의 변화에 따라 오존발생기에 대한 최적 운전점은 변화가 필요하다.

[참 고 문 헌]

- [1] Rakness, Kerwin L, Ozone in drinking water treatment, 177, 2005
- [2] 신영철, 이주봉, 오존매뉴얼, 32, 63, 83, 101, 120, 2007
- [3] 한국수자원공사, 고도정수시설(오존 및 활성탄) 기술진단 가이드북 27, 34, 103, 109, 117, 147, 2009
- [4] Bruno Langlais, David A. Reckhow, Deborah R. Brink, Ozone in Water Application and Engineering 375, 1991
- [5] 이경혁; 신흥섭; 안효원; 채선하; 임재림, 최적 고도정수처리공정 선정을 위한 경제성 평가, 511-516, 2008
- [6] 한국상수도협회, 상수도시설기준 517, 2004