

공기순환장치 적용 오존 플라즈마 살균장치 개발

안준 · 전영남*

조선대학교 환경공학과

Development of Ozone Plasma Sterilizer with Air Circulation Device

June An · Young-Nam Chun*

Department of Environmental Engineering, Chosun University

ABSTRACT

Objectives: The purpose of this study was to develop a new sterilization plasma device that would be proficient at sterilizing and removing pathogenic bacteria and viruses, and applicable to air purification systems.

Methods: In order to understand the performance characteristics, the discharge characteristics of a packed bed DBD reactor and the ozone reduction characteristics of an ozone filter installed at the outlet of the reactor were investigated.

Results: The novel packed-bed DBD reactor was proposed, and it was confirmed that the plasma discharge was uniformly and stably discharged throughout the entire layer, and sufficient ozone was generated for sterilization. The ozone filter was tested for three methods: adsorption, adsorption-decomposition, and catalytic decomposition. When the filter thickness was 30 mm, the ozone concentrations were 0.03 ppm, 0.01 ppm, and 0.21 ppm, respectively. The adsorption and adsorption-decomposition methods satisfied the EPA standard of less than 0.05ppm, but the catalytic decomposition method did not.

Conclusions: It was confirmed that the adsorption-decomposition method has relatively excellent ozone filter performance and can provide the best ozone filter.

Key words: plasma sterilization, DBD plasma, catalytic decomposition, HVAC

I. 서 론

실내공기가 냄새, 유해가스, 분진 또는 발생열 등에 의해 오염되어 인간의 거주 등에 장애를 만드는 경우 오염공기를 실외로 제거해서 청정한 외기와 교체하는 것을 환기라 한다. 만일 실내공기의 청정도 뿐만 아니고 온습도나 기류분포 등까지도 고려하게 되면 그것은 소위 공기조화 시스템(Heating Ventilating and Air Conditioning, HVAC)에 속하게 된다. 따라서 환기라고 하면 실내의 오염된 공기를 신선한 외기와 교환하는 것만을 의미하며 실내의 온습도나 기류 등에 대해서는 고려하지 않는 것이 보통이지만, 실내 환경을 보다 엄밀

하게 정해진 조건으로 유지하기 위해서는 기계적인 공조장치나 공기정화장치를 쓰지 않으면 안 된다.

공기정화시스템은 UV-광촉매 방식(Hong & Lim, 2016; Kim, 2010), 오존발생 방식(Lee et al., 2015), 필터처리 방식(Zhao et al., 2007; Aldred et al., 2015), 저온플라즈마 이온 발생 방식(Franziska et al., 2020) 등이 있다. 현재 시장 점유가 높은 UV-광촉매시스템은 살균, 탈취효과가 크지 않으며 자외선 안전 문제 등이 있어 공조조화 계통에서의 설비반영 추세가 줄어들고 있다. 오존발생 시스템은 실내 공기질 권고기준에서 제한농도기준이 있어 시장유지가 어렵다. 필터처리 시스템은 공기청정기의 주류를 이루고 있지만 먼지제거

*Corresponding author: Young-Nam Chun, Tel: 82-10-3617-7156, E-mail: ynchun@chosun.ac.kr
Department of Environmental Engineering, College of Engineering, Chosun University, 309, Pilmun-daero, Dong-gu, Gwangju, 61452, Republic of Korea

Received: December 4, 2020, Revised: January 5, 2021, Accepted: February 20, 2021

 June An <http://orcid.org/0000-0003-1282-4632>

 Young-Nam Chun <http://orcid.org/0000-0002-7617-7705>

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.

측면의 우수한 장점 외에 병원성세균, 바이러스 살균성능이나 저감 및 제거성능은 미약하고 잦은 필터교환으로 인해 유지비용이 높은 단점이 있다. 저온플라즈마 이온발생 시스템은 미생물 살균은 물론 가스상 입자상 물질에 대한 정화능력이 우수하며, 산소이온발생을 극대화하고 상대적으로 오존발생량은 최소화한 장점으로 산업 전 분야에서 확대되고 있다.

대기압 저온 플라즈마는 일반적으로 유전체 장벽 방전, 코로나 방전, 아크 방전, 글로우 방전 등과 같은 방법이 있다. 이 중 유전체 장벽(dielectric barrier) 방전 장치는 일정한 간격을 둔 평판의 한쪽과 전극을 절연체(=유전체)로 덮여있는 구성으로 되어있으며 교류전압을 걸었을 경우에 일어나는 방전이다(Nisa et al., 2019). 아크방전이나 코로나방전과 같이 방전 사이에서 소리가 나지 않기 때문에 무성방전(無聲放電) 이라고도 불린다. 특히, 유전체 장벽 방전은 절연체를 사용하게 되면 직류 전력의 경우와 같이 전극을 통한 전류의 흐름이 불가능하므로 교류(AC) 전력을 이용하여 플라즈마를 발생시킨다. 안정적인 플라즈마 발생을 위하여 전극 간 간격은 수 밀리미터로 제한되며 플라즈마 가스는 이 간격 사이로 흘러간다. 유전체 장벽 방전은 전극 사이에 대기압 상태의 공기 또는 특정 기체를 통과시키면서 글로우 방전하여 플라즈마를 생성하는데 전류를 차단하면 플라즈마 생성이 중지되고 활성상태의 입자들이 곧바로 사라지기 때문에 제어가 간단하고 잔류물질을 남기지 않는다. 용도에 따라서 다양한 전극구조 형태를 가질 수 있으며 거의 모든 종류의 가스를 혼합하여 플라즈마를 생성할 수 있다. 또한 장비가 간단하고 방전을 쉽게 발생

시킬 수 있으며, 복잡한 펄스 전력 공급기가 없어도 되기 때문에 저렴한 제작비 등의 장점이 있다.

상기에 언급된 바와 같이 공기순환장치에 적용하기 위한 유해 미생물 바이러스를 처리하기 위해서는 저온 플라즈마 방식인 유전체 장벽 플라즈마 방전장치가 최적의 방법이다. 그러나 경제성이 우수한 유전체 장벽 방전영역의 확장과 안정성 확보 그리고 발생된 오존의 최소화로 인한 안전성 확보가 기술적 과제로 남아 있다. 오존은 인체에 노출될 경우 기침과 눈의 자극, 호흡곤란, 두통, 메스꺼움, 기관지염 등의 증상이 발생될 수 있는데 특히 호흡기나 폐 기능이 약한 노약자와 어린이는 오존에 노출될 경우 그 위험이 커져 조심해야 한다.

따라서 본 연구에서는 공기조화용 오존 플라즈마 살균장치를 개발하기 위해 플라즈마 반응기 방전영역이 크고 안정된 운전이 가능한 새로운 형태의 유전체 장벽 충전층 반응기를 제안하여 설계·제작하였다. 그리고 반응기의 방전특성 및 오존저감 특성을 파악하고자 처리가스 유량, 전압변화 특성 그리고 활성탄, MnOx/Al₂O₃, Mn_x/C에 대한 흡착-축매산화 필터에 대한 오존저감특성을 파악하였다.

II. 실험장치 및 방법

본 연구에서 새로이 제안된 플라즈마 살균 실험장치는 Figure 1에 나타낸 바와 같이 유전체 장벽 충전층 반응기(DBD packed bed reactor, DBDPR), 오존제거 필터, 압축기, 전원공급장치로 구성되었다. 유전체 장벽 충전층 반응기는 유전체 장벽판(dielectric barrier

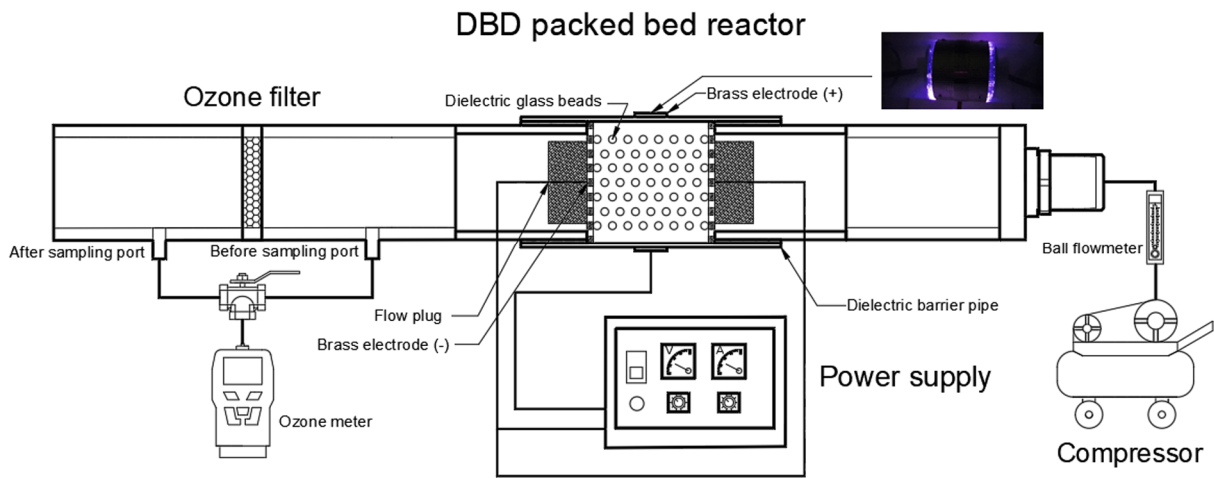


Figure 1. Schematic diagram of sterilization plasma equipment

pipe) 내부에 원형구슬 형태의 유전체 비드(dielectric beads)가 채워져 있고 그 양 측면에 다공질 원판 형태의 음전극(-)위치하고 유전체 장벽관 외부에 일정 폭을 가진 밴드 형태의 양전극(+)으로 되어있다. 그리고 두 개의 음전극 중심부위에 처리가스 흐름방향 블록인 플로우 플러그(flow plug)가 일정 직경과 두께를 가지고 위치하고 있어 유전체 비드내의 유동의 패턴이 유지되는 구조로 되어있다.

오존제거 필터는 DBD 충전층 반응기 후류에 위치하고 있으며 오존필터로 구성되었다. 압축기는 처리가스를 공급하는 것으로 공급 유량의 제어는 유량계로 진행하였다. 전원공급장치는 60 Hz 교류전류 공급이 가능한 고전압 가변 공급장치이다.

실험은 플라즈마 방전특성과 오존필터 오존 저감특성의 두경우에 대해 실험을 진행하였다. 플라즈마 방전특성의 경우 처리가스 유량을 40 L/min~100 L/min의 범위에서 진행되었고 공급전력은 100 W~400 W의 범위에서 각각 변화를 주면서 진행하였다.

그리고 오존필터의 오존 저감특성을 파악하기 위해 유량 40 L/min, 플라즈마 전력 100 W로 일정하게 하고 오존 흡착제거를 위해 활성탄, 촉매산화 특성을 위해 MnOx/Al₂O₃ 그리고 오존 흡착-산화 저감특성을 위해 MnOx/C에 대해 각각 오존저감 특성을 파악하였다. 이를 위해 오존의 농도를 측정하였는데 DBD 충전층 반응기와 오존필터 후단부에 각각 설치되어 있는 샘플링 포트에서 오존 측정기(KH-NPOD-5000, DGOzone Ltd. China)로 측정하였다.

III. 결과 및 고찰

본 연구에서는 공기조화용 오존 플라즈마 살균장치를 개발하기 위해 플라즈마 반응기 방전영역이 크고 안정된 운전이 가능한 새로운 형태의 유전체 장벽 충전층 반응기를 제안하여 설계·제작하였다(Figure 1). 그리고 이에 대한 성능을 파악하기 위해 우선 살균에 가장 중요한 성분인 오존의 생성 반응기 특성을 파악하고 아울러 오존 배출 저감을 위한 필터의 오존저감특성에 대한 연구를 진행하였다.

1. DBD 충전층 반응기 오존생성특성

1) 처리가스 유량변화

Figure 2는 반응기 후단부에 오존필터가 없는 상태

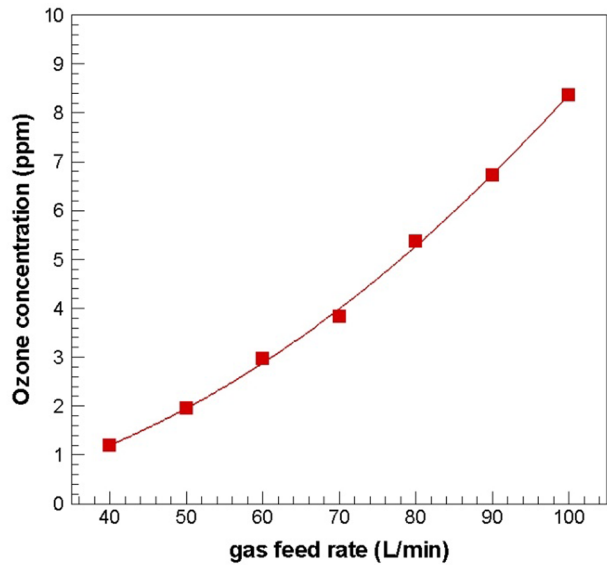
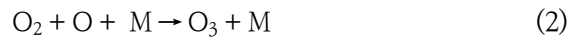
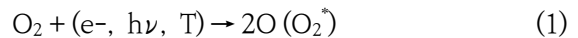


Figure 2. Ozone concentration according to gas feed rate

에서 반응기 자체의 방전과 오존발생 특성을 파악하고자 처리가스 유량변화에 대해 실험을 수행하였다. 이 때 공급전력은 100 W으로 일정하게 유지된 상태에서 처리가스 유량을 40 L/min에서 100 L/min로 변화시켜가면서 실험을 수행하였다.

처리가스 유량이 40 L/min에서 오존의 농도가 1.19 ppm에서 100 L/min일 때 8.37 ppm으로 반응기에서 생성되는 오존의 농도는 점차 증가되었다. 이는 유량이 증가됨에 따라 처리가스인 공기 중의 오존생성 원인물질인 산소의 양이 증가로 인해 오존의 생성량이 증가되기 때문이다.

공업적으로 오존의 생성은 광화학, 화학, 전기화학, 열적으로 생성되며 주 반응 메커니즘은 다음 식과 같다 (Todor et al., 2014).



따라서 공기량 중 산소량의 증가는 상기 식들 (1-3)의 반응이 상대적으로 우선하기 때문에 오존의 생성량이 증가되는 것이다.

본 연구에서 새로이 개발된 유전체 장벽 충전층 반응기(DBD packed bed reactor; DBDPR)는 방전 형태가 균일하고 넓은 영역에서 안정된 상태로 유지되고 이

로 인해 상대적으로 고유량 처리가 가능하여 기존의 DBD방식에 비해 상기 식들(1~3)에 의한 오존발생량이 상대적으로 다량 생성되는 우수한 특성을 가지고 있다 (Nisa et al., 2019).

2) 플라즈마 공급전력 변화

Figure 3은 처리가스 공급유량을 40 L/min으로 일정하게 유지한 상태에서 공급 전력량을 100 W에서 400 W로 변화하였을 때 오존생성특성을 파악하였다.

플라즈마 공급 전력의 양이 증가됨에 따라 오존의 농도가 전력 40W일 때 1.17 ppm에서 전력이 100 W일 때 9.27 ppm으로 증가되었다. 이는 공급 전력량이 증가됨에 따라 처리가스인 공기 중의 전자(e-) 생성량이 증가되어 오존 생성 메커니즘 반응 중 식(1)에 의한 산소원자(O)와 활성산소(O₂^{*})가 증가되기 때문이고 이는 오존생성 반응인 식들(2,3)에 의해 오존이 다량 생성되기 때문이다.

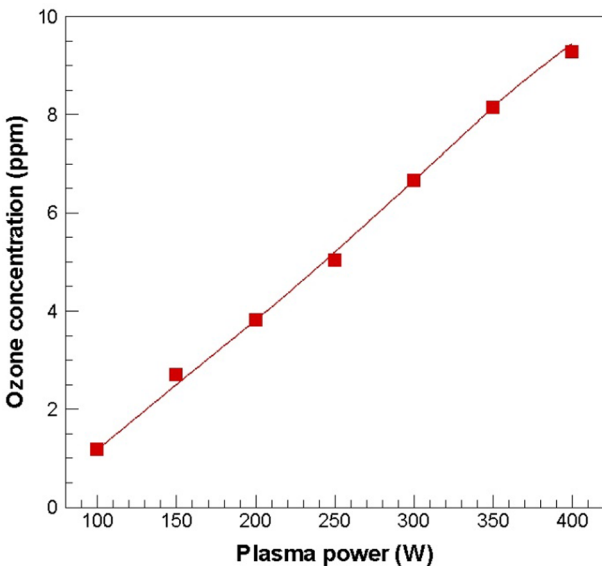


Figure 3. Ozone concentration according to plasma power

2. 흡착-촉매산화 저감특성

미국 EPA 규정은 오존발생장치의 경우 공기 중 오존의 농도가 0.05 ppm이하로 유지되도록 장치에 오존센서와 컨트롤러를 장착하여 오존의 피해가 없도록 규정하고 있다(Mark et al., 2000). 본 연구에서 제안된 유전체 장벽 충전층 반응기 후류에서 발생하는 오존의 농도는 반응기 운전범위에서 최대 9.27 ppm(유량 40

L/min, 파워 400 W)에서 최소 1.17 ppm(유량 40 L/min, 파워 100 W)이 발생된다(Figure 3 참조). 따라서 DBD 충전층 플라즈마 출구에서 생성된 오존이 그 데로 실내에 배출될 경우 EPA기준인 0.05 ppm을 만족 시키지 못한다. 따라서 반응기 후단부에 Figure 1에 나타난 바와 같이 오존필터를 설치하여 일체형 플라즈마 살균장치를 구성하였다.

오존필터의 오존제거 특성을 파악하기 위해 흡착방식(활성탄 흡착), 흡착-분해방식(MnOx/C), 촉매분해 방식(MnOx/Al₂O₃)에 대해 각각 오존저감을 규명하고 이들 방식에 대해 비교하여 최선의 방식을 제시하였다.

Figure 4는 처리가스 유량과 플라즈마 공급전력이 각각 40 L/min과 100 W일 때 활성탄 흡착방식의 결과를 나타낸 것이다.

흡착층의 두께를 10 mm(SHSV=208 L/g·h), 20 mm (SHSV=102 L/g·h), 30 mm(SHSV=68 L/g·h) 변화하였을 때 활성탄 오존필터를 통과한 이후의 농도는 각각 0.35 ppm, 0.12 ppm, 0.03 ppm으로 흡착층 두께가 30 mm일 때 EPA 오존 실내환경기준인 0.05 ppm이하가 만족되었다. 활성탄 필터의 두께가 증가할수록 저감율이 증가되는데 이는 흡착제량의 증가로 인해 오존이 흡착할 수 있는 표면적이 증가되기 때문이다.

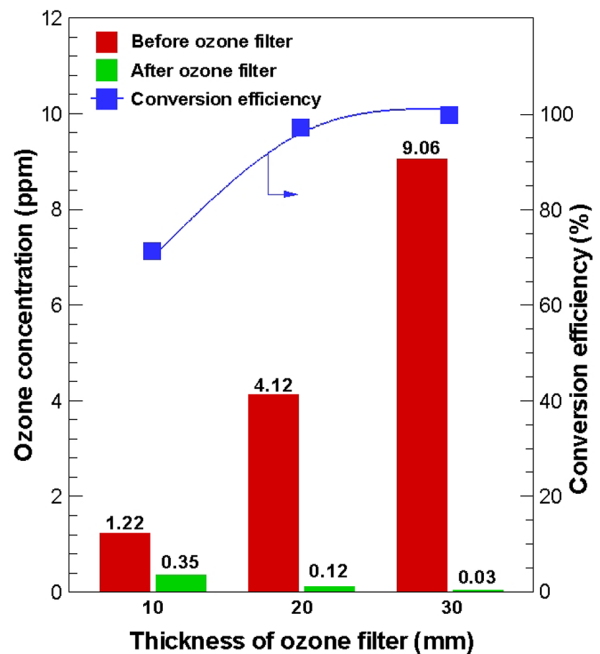


Figure 4. Effect of ozone reduction for activated carbon adsorbent

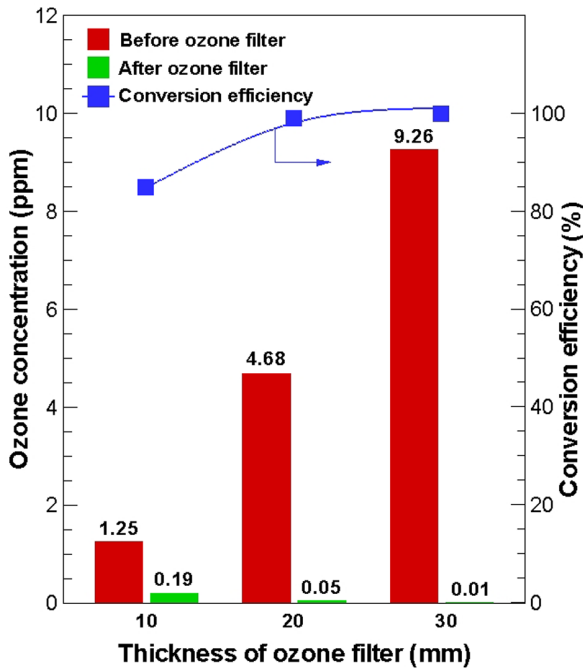


Figure 5. Effect of ozone reduction for adsorption-catalytic decomposition

Figure 5는 처리가스 유량과 플라즈마 공급전력이 각각 40 L/min과 100 W일 때 흡착-분해방식의 결과를 나타낸 것이다.

흡착-분해층의 두께를 흡착제 두께를 10 mm(SHSV=187 L/g·h), 20 mm(SHSV=97 L/g·h), 30 mm(SHSV=66 L/g·h) 변화하였을 때 오존필터를 통과한 이후의 농도는 각각 0.19 ppm, 0.05 ppm, 0.01 ppm으로 흡착-분해층 두께가 20 mm 이상일 때 EPA 오존 실내환경기준이 만족되었다.

촉매 표면에서 오존분해 메커니즘은 다음 반응식과 같다(Todor et al., 2014). 아래 식에서 * 는 활성센터이다.



흡착-분해층이 증가됨에 따라 출구 농도가 감소되는 것은 처리대상 가스인 오존이 활성탄에 흡착되는 양이 상대적으로 많은 상태에서 기공 활성센터(activate center) 표면에 활성화된 촉매에 의해 오존분해 메커니즘 식들

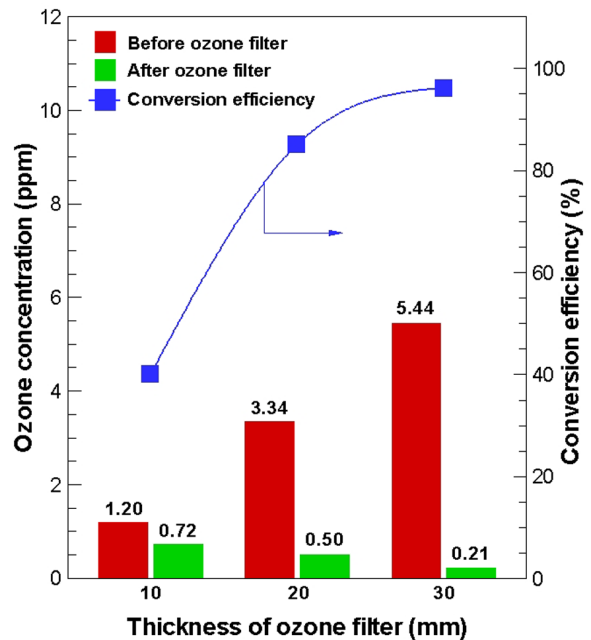


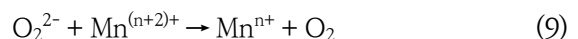
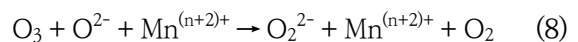
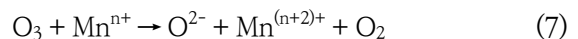
Figure 6. Effect of ozone reduction for catalytic decomposition

(4-6)에 의해 오존분해 반응이 증가되기 때문이다. 이로 인해 오존 저감율이 증가 되는 것을 알 수 있다.

Figure 6은 처리가스 유량과 플라즈마 공급전력이 각각 40 L/min과 100 W일 때 촉매분해 방식의 결과를 나타낸 것이다.

촉매분해층의 두께를 흡착제 두께를 10 mm(SHSV=104 L/g·h), 20 mm(SHSV=51 L/g·h), 30 mm(SHSV=35 L/g·h)변화하였을 때 촉매분해층 오존필터를 통과한 이후의 농도는 각각 0.72 ppm, 0.50 ppm, 0.21 ppm으로 촉매분해층 두께가 10~30 mm 모든 경우 EPA 오존 실내환경기준이 만족하지 못하였다.

MnOx/Al2O3 표면에서 오존분해 메커니즘은 다음 반응식과 같다(Todor et al., 2014).



촉매분해층의 두께가 증가할 수록 오존(O₃)과 망간이온(Mn⁽ⁿ⁺²⁾⁺, Mnⁿ⁺)에 의해 반응이 활성화되어 촉매표면에서 오존분해 메커니즘 반응식들 (7-9)이 증배되기 때문이다. 이로 인해 오존 저감율도 촉매분해층이 증가됨에 따라 역시 증가되었다.

IV. 결 론

공기정화시스템에 적용가능한 DBD 충전형 반응기와 오존필터로 구성된 새로운 형태의 일체형 오존 플라즈마 살균 장치를 개발하였다. 그리고 장치 성능특성을 파악하기 위해 DBD 충전층 반응기 방전특성과 오존필터의 오존 저감특성에 대해 규명하였으며 그 결과는 다음과 같다.

DBD 충전층 반응기는 플라즈마 방전이 충전층 내에 균일하고 안정되게 방전되었으며 바이러스 살균이 충분히 가능한 정도의 오존농도인 1.17 ppm~9.27 ppm이 발생되었다.

오존필터의 오존제거 특성을 파악하기 위해 흡착방식(활성탄 흡착), 흡착-분해방식(MnOx/C), 촉매분해 방식(MnOx/Al₂O₃)에 대해 각각 오존저감을 규명하였으며 그 결과는 다음과 같다.

흡착방식은 필터의 두께가 30 mm일 때 오존필터를 통과한 농도가 0.03 ppm이고 흡착-분해 방식의 경우는 필터의 두께가 20 mm와 30 mm일 때 각각 0.05 ppm, 0.01 ppm로 EPA 오존 실내환경기준(0.05 ppm 이하)을 만족하였다. 그러나 촉매 분해방식은 필터의 두께가 30 mm일 때 0.21 ppm으로 EPA기준에 충족되지 못해 실용성이 없는 것이 확인되었다.

감사의 글

이 논문은 2020학년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구 되었음

References

Aldred JR, Darling E, Morison G, Siegel J, Corsi RL. Benefit-cost analysis of commercially available activated carbon filters for indoor ozone removal in single-family homes. *INDOOR AIR* 2015;26(3):

501-512 (<https://doi.org/10.1111/ina.12220>)

Franziska P, Eric T, Manfred K, Katharina S, Sebastian G, et al. Inactivation of airborne bacteria by plasma treatment and ionic wind for indoor air cleaning. *Plasma Process Polym.* 2020;17(9):1-12 (<https://doi.org/10.1002/ppap.202000027>)

Hong JK, Lim GY. An experimental study on the air sterilization performance of a reflective electro magnetic energy system. *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering* 2016; 28(12):509-514

Kim YH. Air disinfection and cleaning system implantable in duct and AHU. *The Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineering of Korea* 2010;6:1148-1152

Lee HG, Kim TH, Jung JS, Kim JG. a basic study on inner air filter sterilization system using ozone. *The Korean institute of Electrical Engineers* 2015;7:1206-1207

Mark AM, Leslie ES, Scott AM, Ivan D, Richard BP. Characterization of ozone emissions from air cleaners equipped with ozone generators and sensor and feedback control circuitry. *AIR AND WASTE MANAGEMENT ASSOCIATION-PUBLICATIONS-VIP* 2000;98:254-269.

Nisa A, Firdausi KS, Kanie MAJ, Susan AI, Yulianto E, et al. Ozone production by dielectric barrier discharges plasma of coaxial cylindrical electrodes configuration using oxygen and argon source. *Journal of Physics: Conference Series* 2019;1170: 1-6 (<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1170/1/012017>)

Todor B, Vladimir G, Metody A, Alavcho R, Gennadi E.Z. Ozone decomposition. *Interdisciplinary toxicology* 2014;7(2):47-59 (<http://doi.org/10.2478/intox-2014-0008>)

Zhao P, Siegel JA, Corsi RL. Ozone removal by HVAC filters. *Atmospheric Environ* 2007;41(15):3151-3160 (<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.06.059>)

<저자정보>

안준(연구원), 전영남(교수)