

Efficacy and Safety Evaluation of an Air Sterilizer Equipped With an Electrolytic Salt Catalyst for the Removal of Indoor Microbial Pollutants

Sun Nyoung Yu^{1†}, Ho-Yeon Jeon^{1†}, Bu Kyung Kim¹, Ae-Li Kim¹, Kyung Il Jung², Gye Rok Jeon² and Soon Cheol Ahn^{1*}

¹Department of Microbiology and Immunology, Pusan National University School of Medicine, Yangsan 50612, Korea

²Technical Institute of Exsol-IT Corporation, Yangsan 50612, Korea

Received June 12, 2024 / Revised July 6, 2024 / Accepted July 16, 2024

Recently, there has been increasing interest in enhancing the indoor air quality, particularly in response to the growing utilization of public facilities. The focus of this study was on assessing the efficacy and safety of an air sterilizer equipped with electrolytic salt catalysts. To that end, we evaluated the antimicrobial activity of the vapor spraying from the air sterilizer and its cytotoxicity in condensed form on human cell lines (HaCaT, BEAS-2B, and THP-1). Against the test organisms, which comprised five bacterial strains (*Staphylococcus aureus*, *Bacillus subtilis*, *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Salmonella typhimurium*) and one fungal strain (*Candida albicans*), the air sterilizer exhibited relatively high antimicrobial activities ranging from 10.89 to 73.98% following 1 and 3 hr of vapor spraying, which were notably time-dependent. Importantly, cytotoxicity assessments on human cells indicated no significant harmful effect even at a 1.0% concentration. Comprehensive safety evaluations included morphological observations, gene expression (Bcl-2, Bax) tests, and FACS analysis of intracellular ROS levels. Consistent with previous cytotoxicity findings, these estimates demonstrated no significant changes, highlighting the air sterilizer's safety and antimicrobial activities. In a simulated 20-hr operation within an indoor environment, the air sterilizer not only showed an 89.4% removal of total bacteria but also a 100.0% removal of *Escherichia* sp. and fungi. This research outlines the potential of the developed electrolytic salt catalyst air sterilizer to effectively remove indoor microbial pollutants without compromising human safety, underscoring the solution that it offers for improving indoor air quality.

Key words : Air pollutant, air sterilizer, antimicrobial effects, electrolysis, salt catalyst

서 론

현대인의 생활수준이 향상됨에 따라 건강에 대한 관심이 증대되고 있으며 건강과 직결되는 다중이용시설 및 가정에서 다양한 형태의 공기청정기와 공기살균기의 보급이 확산되고 있다. 다중이용시설의 실내공기 오염은 공기매개 전염성 세균 및 바이러스 등에 대한 노출로 불안감을 고조시킬 수 있다. 이로 인하여 실내 공기의 질 관련법에 대한 규정도 강화되고 있으며, 2004년 실내공기질 관리법이 제정되고 2024년 “다중이용시설의 실내 공기의 질

관리법”으로 개정되어 현재 시행되고 있는 실정이다[9]. 특히 World Health Organization (WHO)에서는 실내 공기 오염이 재실자의 건강에 중요한 영향을 미칠 수 있다고 판단하여 실내공기 오염 물질 중 생물학적 인자에 대한 실내공기질 가이드라인(indoor air quality guidelines)을 제시하고 있다[1]. 생물학적 오염물질로는 세균(bacteria), 바이러스(viruses), 진균(mold) 및 곤충, 진드기(mite), 동물 알러젠(animal allergens) 등이 있다[6, 7]. 21세기에 들어서면서 2003년 급성호흡기증후군(severe acute respiratory syndrome, SARS)의 확산, 2009년 신종인플루엔자의 대유행(pandemic), 2019년 COVID-19 대유행이 바이러스의 공기 전파(air transmission)에 의한 감염으로 밝혀지면서, 실내 공기에서 생물학적 오염에 대한 관심이 크게 부각되었다. 그러나 아직 생물학적 오염에 대한 지식과 정보가 매우 부족하여 실내공간에서 생물학적 오염에 대해 효과적으로 대처하지 못하고 있는 실정이다.

기존 공기 청정기는 온·습도 및 공기 중 유해 미생물 정화를 미약하게나마 조정할 수 있으나, 다중이용시설의

[†]Authors contributed equally.

*Corresponding author

Tel : +82-82-51-510-8092, Fax : +82-55-382-8090

E-mail : ahnsc@pusan.ac.kr

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.

특수한 환경 때문에 각종 세균과 바이러스 등 유해 미생물의 살균에 대한 조치가 미흡하여 공기 중에 미생물들이 산포되어 존재하고 있다[12]. 미생물 살균에는 자외선 조사, 방사선 조사 및 열, 약품과 오존 처리 등 다양한 방법들이 적용되고 있다[13, 14, 17]. 하지만 각각의 방법들은 투과성이 높지 않거나, 살균 소요시간이 길거나, 지속성이 짧고, 고가의 유지비를 필요로 하는 등 살균을 지속하기에 다양한 어려움을 가지고 있다. 따라서 공기 내 미생물을 살균할 수 있는 새로운 기술에 대한 필요성이 대두되어 플라즈마, 광촉매, 필터, 염촉매 방식 등의 기법들이 공기 정화 및 살균에 적용되고 있다. 이들 살균 기법들은 각각 장·단점을 지니고 있으므로 용도별로 각각의 공기 정화 및 살균 기법을 적용한 제품 등이 선택되어 사용되고 있다[3, 5, 10, 11]. 반면에 염촉매 전기분해 기법은 식염수 또는 바닷물을 수조에 넣고 전기분해를 하면서 초음파로 타격하면 바닷물 성분이 기체성 분자로 변형되면서 생성된 미네랄 소금 안개가 대량으로 발생된다. 이때, 비중이 가벼운 유해성 물질로 구성된 기체성 분자들은 중력의 작용에 의해 대기 중으로 즉시 증발한다. 즉, 인체에 해로운 기체성 분자들은 대기 중으로 날아가 버리고, 사람에게 이로운 친환경 살균수인 차아염소산나트륨(NaClO) 성분과 차아염소산수(HOCl) 성분이 기체성 미네랄 소금 안개 형태로 대량으로 발생된다. 이 안개를 5분 정도 흡기하면 인체의 각 기관에 기생하고 있는 각종 유해 미생물(세균, 진균, 바이러스 등)들이 안개 형태로 가공된 미네랄 소금에 의해 각종 유해 세균의 단백질 성분을 파괴시켜 살균 효과가 유발된다고 보고되었다[4, 8, 15].

본 연구에서는 염촉매(소금물) 전기분해 기법을 적용한 공기살균기를 개발하고 공기살균기를 일정 공간내에

설치한 전·후의 공기 중 유해 미생물(세균, 진균)들의 살균 효과를 평가하였다.

재료 및 방법

염촉매 전기분해 공기살균기의 개발

공기 중에 내포되어 있는 유해 미생물(세균, 진균, 바이러스) 등을 살균할 수 있도록 제작된 공기살균기의 구성도는 Fig. 1과 같으며, 소금물 수조, 전기분해부, 초음파 분무부, 외부공기 흡입부, 제어부, 공기 배출부 등으로 구성되었다. 소금물 수조는 소금과 물을 일정한 농도로 희석(소금:물=0.1:0.9)하여 저장하는 역할을 수행하고, 전기분해부에 사용한 전극은 경도가 단단하고 내열연성과 내식성이 우수한 특성을 지니는 아노다이징 코팅하여 제작하였다. 전기분해부에 의해 소금물을 전기분해하면 (+)극에서는 $Cl_2 + H_2O \rightarrow HOCl + HCl$ 의 반응을 통해 차아염소산수(HOCl), (-)극에서는 $2Na + 2H_2O \rightarrow 2NaOH + H_2$ 의 반응을 통해 궁극적으로 차아염소산나트륨수(NaClO)가 생성되며, 차아염소산수와 차아염소산나트륨수는 친환경 살균수로 살균력 또한 우수한 특성을 지닌다. 외부 공기 흡입부에는 외부 공기를 공기살균기로 흡입하기 위해 흡입 팬 모터를 장착하였다. 흡입된 공기에 전기분해부와 초음파 분무부에 의해 생성된 차아염소산나트륨수와 차아염소산수가 혼입되어 분무되면서 공기 중에 내포된 유해 미생물들을 살균하는 기능을 수행하였다. 살균된 증기를 공기 송풍부를 사용하여 실내로 배출시켰다. 공기살균기에 사용되는 염 용액은 2 l의 증류수에 5 g의 NaCl (Junsei Chemical Co., Ltd., Tokyo, Japan)을 첨가하여 제조하고 공기살균기를 가동시켜 염촉매 전기분해 증기를 분

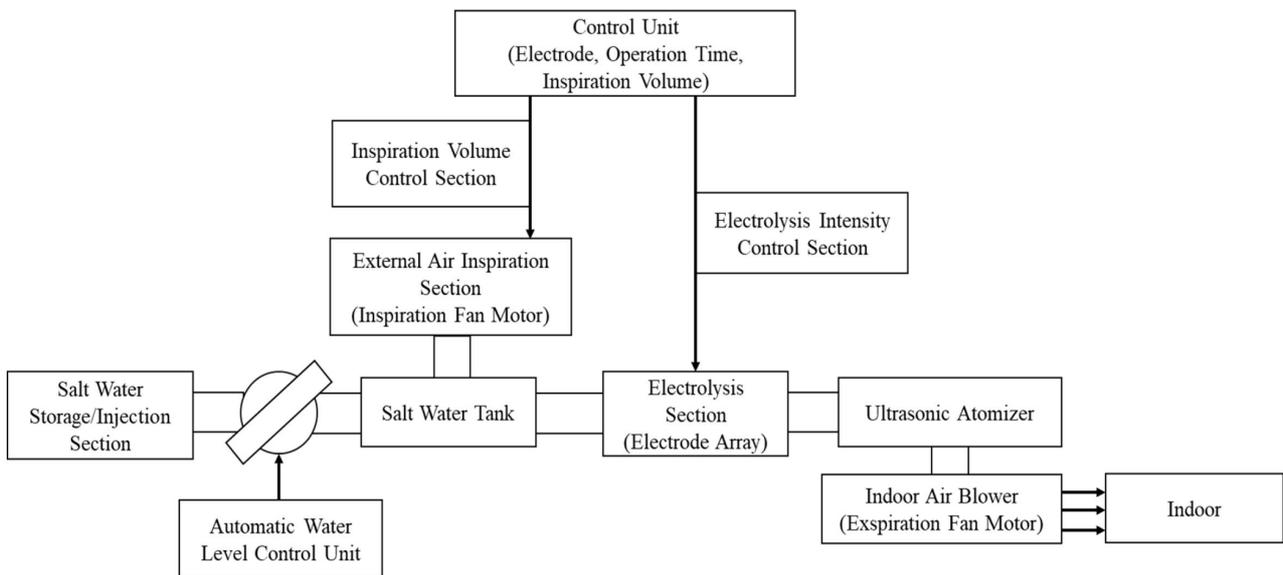


Fig. 1. Block diagram of air sterilizer operated by electrolytic salt catalyst.



Fig. 2. Photograph of air sterilizer operated by electrolytic salt catalyst.

무하였다. 이러한 일련의 과정을 수행하는 염촉매 전기분해 기법을 적용하여 제작된 공기살균기는 Fig. 2와 같았다.

시험 균주와 세포주 및 배양

항균활성 평가를 위해 사용한 시험 균주와 배지는 Table 1과 같았다. 실험에 사용된 각 균주는 한국생명공학연구원 생물자원센터(Korean Collection for Type Cultures, KCTC, Jeongeop, Korea)에서 분양받았다. 각 균주들은 1%의 농도로 각각의 배지에 접종하여 37°C에서 진탕 배양하였고 배양액을 평판배지에 도말하여 사용하였고, 남은 균주는 20% glycerol stock으로 -80°C에서 보관하면서 사용하였다.

세포독성 평가를 위해 사용된 세포주는 인체 정상 폐 상피 세포주(BEAS-2B), 인체 정상 피부 각질 세포주(HaCaT), 인체 단핵구 세포주(THP-1)로서 한국세포주은행(Korean Cell Line Bank, KCLB, Seoul, Korea)에서 분양 받았으며 37°C의 5% CO₂ 조건에서 배양하였다. 구체적으로, BEAS-2B와 THP-1 세포주는 RPMI1640 cell culture media (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA)에서 배양하였고, HaCaT 세포주는 DMEM high glucose cell culture media (Sigma-Aldrich)에서 10% Fetal bovine serum (FBS, Gibco,

New York, NY, USA) 1% penicillin/streptomycin solution (Gibco)을 포함하여 배양하였다.

공기 살균기의 항균활성 평가

공기살균기의 항균활성을 평가하기 위하여 각 균주의 최적 배지에 1.5% agar (LPS Solution, Seoul, Korea)를 포함한 평판배지를 제작하였다. 각 균주를 Table 1에 나타난 최적 배지에서 18시간 동안 액체 배양하여 종균을 얻었다. 진균은 300 CFU/plate, 세균은 500-600 CFU/plate가 되도록 희석하여 각 시험 균주를 평판배지에 도말하고, clean bench 내에서 30분간 완전히 건조하여 공기살균기로부터 분무되는 증기에 의해 도말된 균이 흘러내리는 현상을 방지하였다. 대조군은 아무것도 처리하지 않고 각 시험균주는 공기살균기를 가동하여 시험 균주의 도말배지로부터 30 cm 거리에서 증기를 분무하였고, 30분 간격으로 배지의 위치를 변경하면서 1시간과 3시간 동안 분무된 증기를 도말배지에 접촉하였다. 그 후, 시험균주의 도말배지를 37°C 배양기에서 24시간 동안 배양하면서 나타나는 집락의 수(colony forming unit, CFU)를 측정하고 평균값을 측정하였다.

공기살균기의 독성 평가

세포 생존율 측정

3-(4,5-Dimethylthiazol-2-yl)-2,5-diphenyltetrazolium bromide (MTT; Duchefa Farma B.V., Haarlem, Netherlands)를 이용하여 BEAS-2B와 HaCaT 세포주의 세포 생존율을 측정하였다. 각 세포를 1×10⁴ cells/250 μl/48 well에 seeding하여 24시간 배양한 후, 염촉매 전기분해 공기살균기의 분무 증기로부터 응축시킨 용액(분무액, spraying vapor)을 채취 10분 이내에 각각의 세포주에 0.1, 0.3, 1.0%로 처리하였다. 37°C, 5% CO₂ 조건에서 24시간 배양한 후 MTT 시약을 0.5 mg/ml의 농도로 첨가하였다. 이를 37°C에서 3시간 반응시킨 후, 상등액을 제거하고 침전물로 생성된 formazan complex를 dimethyl sulfoxide (DMSO, Junsei Chemical Co., Ltd.)로 녹여서 SpectraMax M2e (Molecular Device, San Jose, CA, USA)를 이용하여 파장 570 nm에서의 흡광도를 측정하였다. 부유세포인 THP-1 세포주의 경우에는 동일한 조건에서 분무액을 처리한 후, Cell Counting

Table 1. List of test microorganisms and culture media

Classification	Microorganism	KCTC. No.	Culture media
Gram (+) bacteria	<i>Bacillus subtilis</i>	1021	Nutrient broth (BD Difco, Franklin Lakes, NJ, USA)
	<i>Staphylococcus aureus</i>	1927	
Gram (-) bacteria	<i>Escherichia coli</i>	1924	Luria Bertani broth (LPS Solution, Daejeon, Korea)
	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	1750	
	<i>Salmonella typhimurium</i>	1926	
Fungi	<i>Candida albicans</i>	7965	Yeast malt broth (BD Difco, Franklin Lakes, NJ, USA)

Kit-8 (CCK-8, Sigma-Aldrich)을 이용하여 세포 생존율을 측정하였다. 또한 분무액을 각각의 세포주에 1%로 처리하고 24시간 배양한 후, 세포의 형태학적 모양을 광학현미경(Carl Zeiss, Oberkochen, Germany)을 이용하여 400배로 관찰하였다.

세포사멸 유전자 발현 측정

각 세포주에 분무액을 1% 농도로 처리하고 24시간 배양한 후, 배지를 제거하고 분리된 세포를 PBS로 세척하여 RiboEX solution (GeneAll, Seoul, Korea)을 이용하여 total RNA를 분리하였다[2]. 추출한 RNA를 NanoDrop spectrophotometer ND-8000 (NanoDrop Technologies, Wilmington, DE, USA)을 이용하여 정량한 후 TOPscript™MRT DryMX (Enzynomics, Daejeon, Korea)를 이용하여 cDNA를 합성하였다. 이를 template로 하여 세포사멸 관련 유전자인 Bcl-2 (forward, 5'-GAA GTA GGA AAG GAG GCC ATC-3'; reverse, 5'-TGG TTT CCC TTT TCT ACT TTG-3'), Bax (forward, 5'-GGT CTG CTG ACC TCA CTT GTG-3'; reverse, 5'-CTG GTG GAC AAC ATC GCT CTG-3'), 그리고 housekeeping 유전자로서 18S rRNA (forward, 5'-CGG CTA CCA CAT CCA AGG AA-3'; reverse, 5'-GCT GGA ATT ACC GCG GCT-3')의 primer를 사용하고 TOPreal™ qPCR 2X PreMIX (Enzynomics)를 이용하여 각 유전자의 특정 부위를 증폭시켰다. 얻어진 결과는 18S rRNA의 결과를 기준으로 normalizaion하여 나타냈다.

Reactive oxygen speices (ROS)의 측정

세포 내 활성산소인 ROS의 변화를 조사하기 위하여 2',7'-dichlorofluorescein diacetate (DCFH-DA, F. Hoffmann-La Roche AG, Basel, Switzerland)를 이용하여 측정하였다 [16]. BEAS-2B, HaCaT와 THP-1의 세포를 1×10⁵ cells/well의 농도로 6-well plate에 seeding하여 24시간 동안 안정화시킨 후 분무액을 1% 농도로 처리하였다. 배양 24시간 후, 세포를 PBS로 세척한 뒤 10 μM의 DCFH-DA를 처리하고 37°C에서 30분간 염색한 후 BD FACS Canto II flow cytometry (BD, Camden, NJ, USA)를 사용하여 ROS를 측정하였다.

다중이용시설에서 공기살균기의 살균효능 평가

다중이용시설에서 공기살균기의 효능을 평가하기 위해 지름 90 mm의 petri dish에 LB 배지, MacConkey 배지와 PDB 배지를 첨가한 한천 평판배지를 사용하였다. LB 한천배지는 공기 중 낙하 세균 전체, MacConkey 한천배지는 공기 중 낙하 대장균, PDA 한천배지는 공기 중 낙하 진균을 확인하기 위하여 사용하였다. 공기살균기의 효능을 평가하기 위하여 특정 사무실(7,820 mm × 5,160 mm × 2,570 mm, W × L × H)을 실험 장소로 선정하였고, 공기 중의 낙하균을 포집하기 위하여 총 5곳의 장소에 바닥으로부터 1 m의 높이에 평판배지를 6시간 동안 설치하였다(Fig. 3). 이때 사무실의 출입구를 폐쇄하여 사람의 출입을 통제하였으며, 공기살균기 2대의 위치는 출입구를 등지고 중앙

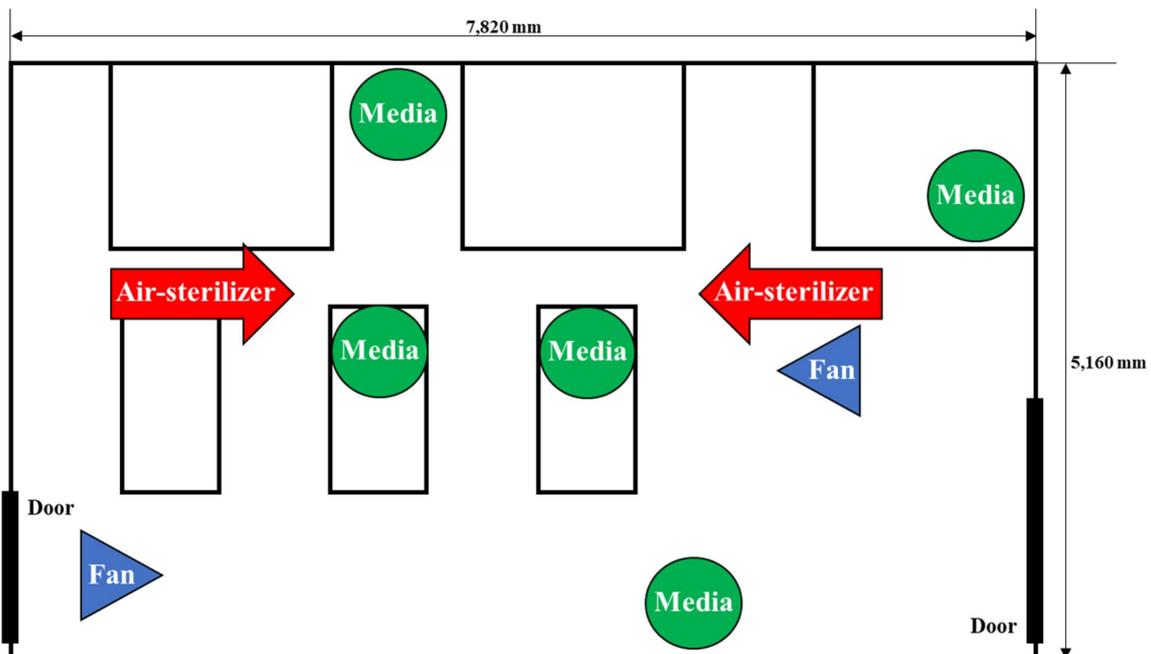


Fig. 3. Floor plan of test office room for air sterilization. The air-sterilizer was located in the direction of the airflow, indicated by arrows. A fan was located to assist air circulation. Microbial media such as LB, MacConkey, and PDA were placed at each location. The height of the room was 2,570 mm.

을 향해 설치하였으며, 사무실 내의 공기순환을 위하여 2대의 공기순환기를 동시에 가동하였다. 공기살균기를 가동 전과 20시간 가동 후, 총 5곳의 평판배지에 공기 중 낙하균을 포집하고 30°C(PDB)와 37°C(LB, MacConkey)에서 배양한 후 나타난 집락의 수(CFU)를 세고 평균값을 측정하였다.

결과 및 고찰

공기살균기의 항균활성 평가

공기살균기의 항균활성 평가를 위해 시험균주를 각각의 배지에 배양한 후, 시험균별 및 시간별 항균활성을 측정하였다. 각 시험균주를 각각의 평판배지에 도말하고 각각 1, 3시간 동안 공기살균기로부터 배출되는 증기를 분무하여 배양한 결과, Table 2와 같았다. 증기를 분무하지

않은 대조군의 배지에서는 Gram 양성균과 Gram 음성균의 수가 524±74.08–624±16.00 CFU이었고, 진균(*Candida albicans*)은 341±39.71 CFU로 나타났다. 공기살균기로부터 염색매 전기분해 증기를 1시간 동안 분무한 뒤 배양한 배지에서는 Gram 양성균인 *Bacillus subtilis*가 391±216.31 CFU, *Staphylococcus aureus*가 454±62.39 CFU로 나타나, 각각 31.54와 18.93%의 항균활성, Gram 음성균인 *Escherichia coli*가 505±30.29 CFU, *Pseudomonas aeruginosa*가 416±34.64 CFU, *Salmonella typhimurium*가 549±31.07 CFU가 나타나 각각 9.76, 20.61, 11.97%의 항균활성, 진균인 *C. albicans*가 195±10.26 CFU가 나타나 42.66%의 항진균활성을 보였다. 한편 3시간 동안 증기를 분무한 후 배양한 배지에서는 Gram 양성균인 *B. subtilis*가 207±184.72 CFU, *S. aureus*가 167±24.19 CFU가 나타나 각각 63.67과 70.24%의 항균활성, Gram 음성균인 *E. coli*가 255±25.01 CFU, *P.*

Table 2. Growth inhibitory activity of air sterilizer operated by electrolytic salt catalyst

Classification	Microorganism	Colony forming unit (CFU)			Growth inhibitory activity (%)	
		Control	1 hr	3 hr	1 hr	3 hr
Gram (+) bacteria	<i>Bacillus subtilis</i>	571±90.18	391±216.31	207±184.72	31.54	63.67
	<i>Staphylococcus aureus</i>	560±32.74	454±62.39	167±24.19	18.93	70.24
Gram (-) bacteria	<i>Escherichia coli</i>	560±57.69	505±30.29	255±25.01	9.76	54.40
	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	524±74.08	416±34.64	84±44.19	20.61	83.97
	<i>Salmonella typhimurium</i>	624±16.00	549±31.07	380±77.87	11.97	39.10
Fungi	<i>Candida albicans</i>	341±39.71	195±10.26	141±23.86	42.66	58.51

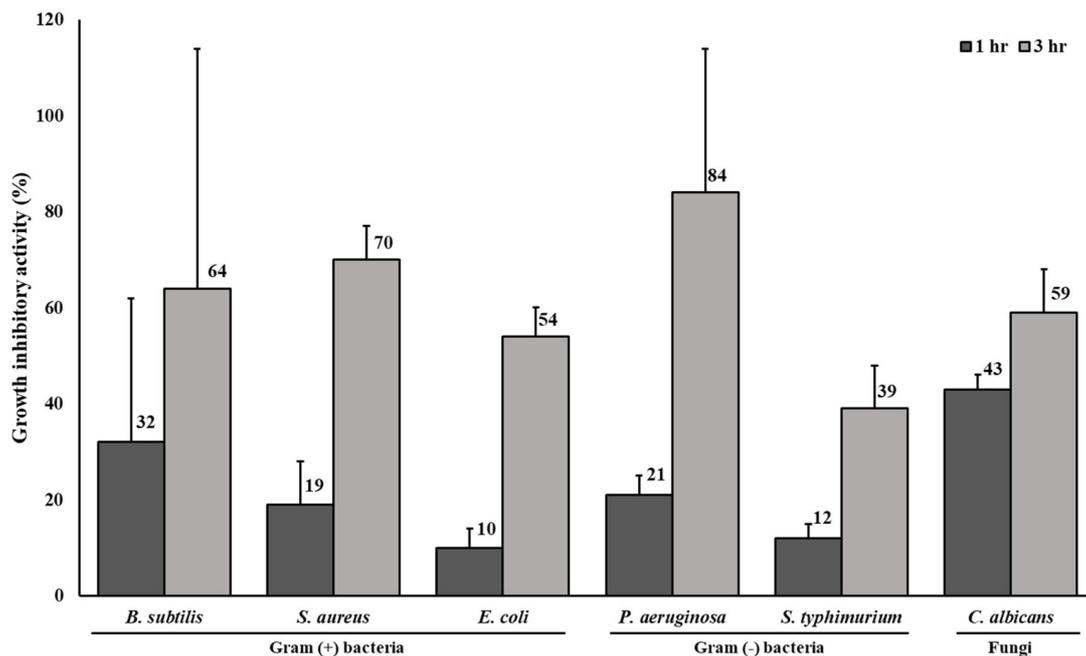


Fig. 4. Growth inhibitory activity of air sterilizer operated by electrolytic salt catalyst. *B. subtilis*; *Bacillus subtilis*, *S. aureus*; *Staphylococcus aureus*, *E. coli*; *Escherichia coil*, *P. aeruginosa*; *Pseudomonas aeruginosa*, *S. typhimurium*; *Salmonella typhimurium*, *C. albicans*; *Candida albicans*.

*aeruginosa*가 84 ± 44.19 CFU, *S. typhimurium*가 380 ± 77.87 CFU가 나타나 각각 54.40, 83.97, 39.10%의 항균활성, 진균인 *C. albicans*가 141 ± 23.86 CFU가 나타나 58.51%의 높은 항진균활성을 보였다.

따라서 공기살균기로부터 배출된 증기를 시험균주에 1시간 동안 분무한 경우, 10% 이상의 항균활성과 40% 정

도의 항진균활성을 나타냈고, 3시간 동안 분무한 경우에는 39%에서 최대 84%에 이르는 높은 항균활성과 60% 정도의 항진균활성을 나타냈다. 이를 통해 염착매 전기분해 공기살균기는 항균활성의 경우, 시간 의존적으로 모든 종류의 Gram 양성균과 Gram 음성균에서 살균효능이 증가하였고, 항진균활성의 경우에는 시간 의존적으로 증가

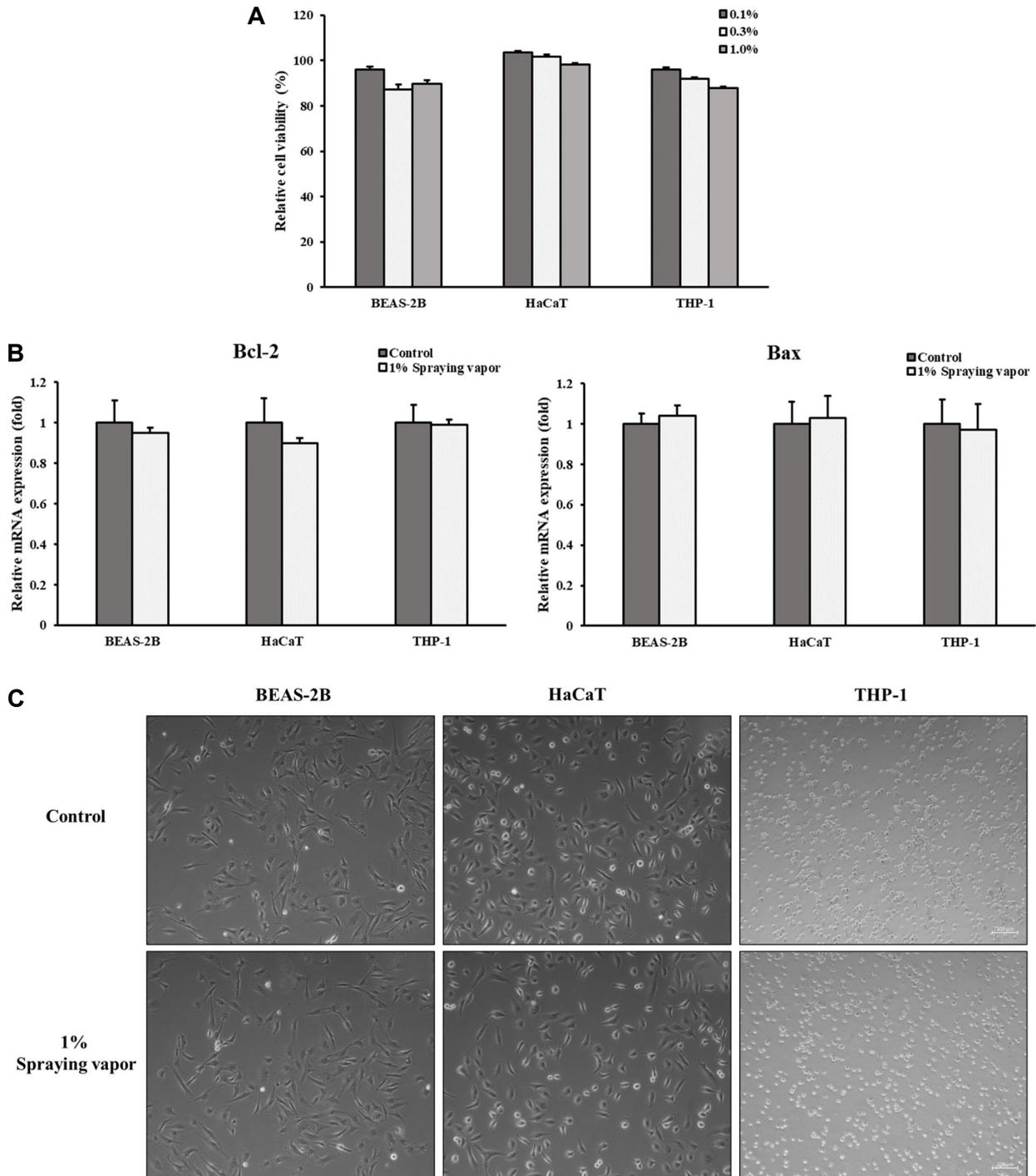


Fig. 5. Effect of air sterilizer operated by salt electrolytic catalyst on cell cytotoxicity of human cell lines. (A) Cell viability. (B) Expression of the apoptosis-related mRNA. (C) Cell morphology.

하였으나 항균활성에 비해 증가율은 낮았다(Fig. 4).

공기살균기의 세포독성 평가

공기살균기의 세포독성 평가를 위해 인체 정상 세포주에 대한 세포생존율, 형태학적 변화, 세포사멸 유전자(Bcl-2, Bax) 발현, 세포 내 산화적 스트레스(ROS) 등의 안전성 평가를 수행하였다.

공기살균기의 분무 증기로부터 응축시킨 용액(분무액, spraying vapor)의 인체 정상 폐 상피 세포주(BEAS-2B), 인체 정상 피부 각질 세포주(HaCaT), 인체 단핵구 세포주(THP-1)에 미치는 영향을 측정하기 위하여 MTT와 CCK-8 kit를 이용하여 세포 생존율을 측정하였다. 얼음 위에 올려둔 멸균된 petri dish를 향해 공기살균기의 염축매 전기 분해 증기 분무액을 응축하고 10분 이내에 각 세포에 0.1, 0.3, 1.0%의 농도로 처리하고 24시간 배양한 후 각 세포주

에 대한 세포 생존율을 측정하였다. 분무액을 0.3, 0.1%의 농도로 처리했을 때 유의적인 세포독성이 관찰되지 않았으며, 1%의 농도로 처리했을 경우에도 93.88%(BEAS-2B), 97.01%(HaCaT), 86.56%(THP-1)의 세포 생존율을 보여 공기살균기의 분무액은 인간 세포주에 대해 유의적인 세포독성을 보이지 않았다(Fig. 5A).

공기살균기의 분무액을 1%의 농도로 각 세포주에 처리하여 세포사멸과 관련된 Bcl-2와 Bax의 유전자 발현의 변화를 조사한 결과는 Fig. 5B와 같았다. 대조군과 비교한 결과, 분무액의 처리에 의해 세포사멸 관련 유전자의 mRNA level에서 유의적인 차이를 나타내지 않았다. 또한 분무액을 1%의 농도로 처리했을 때, 세포 형태의 변화를 현미경으로 육안적 관찰한 결과, Fig. 5C와 같이 분무액을 처리하지 않은 대조군과 분무액을 1%의 농도로 처리한 결과를 육안적으로 관찰했을 때 세포의 형태적인 변화가

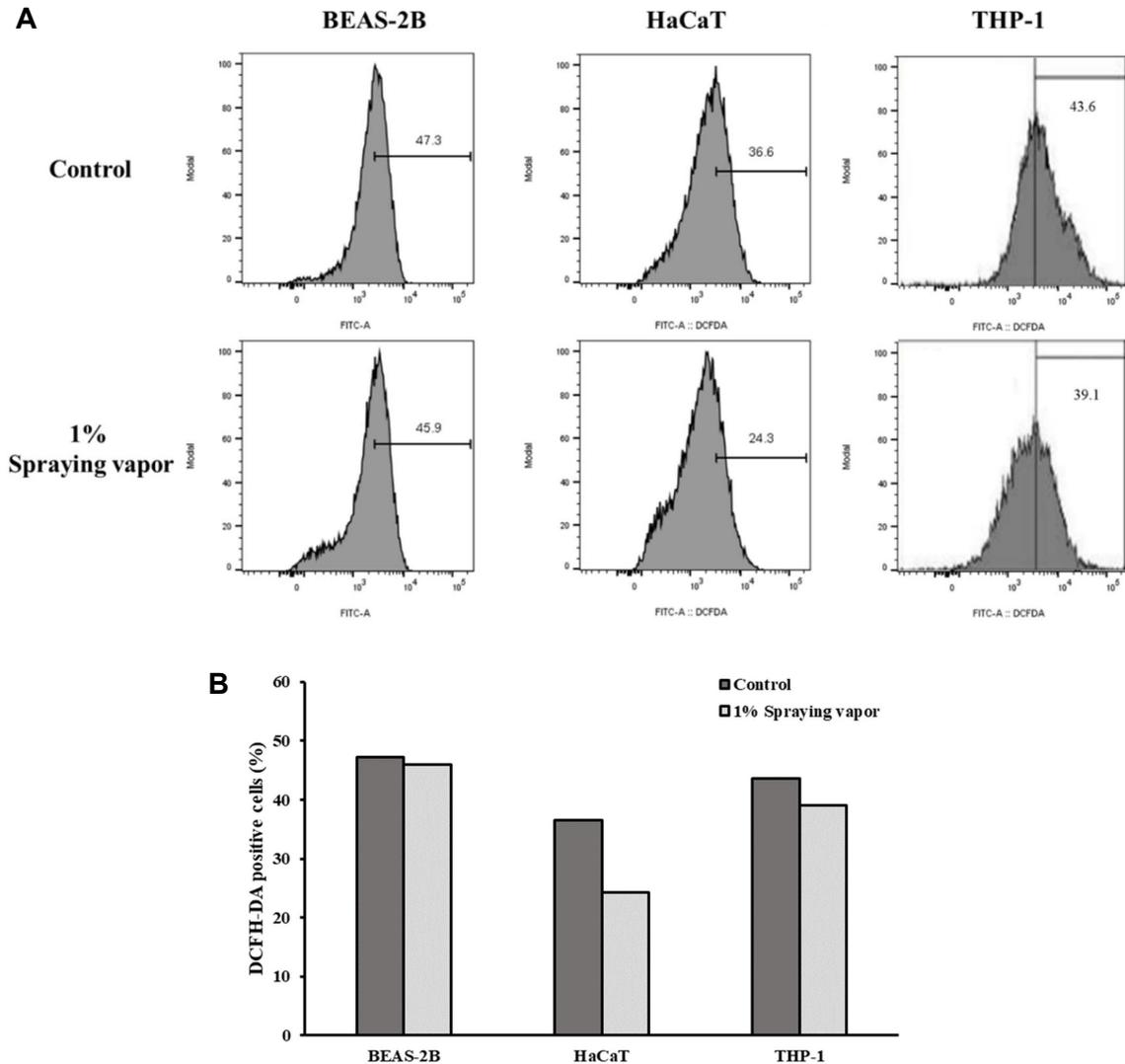


Fig. 6. Effect of air sterilizer operated by salt electrolytic catalyst on production of reactive oxygen species (ROS) of human cell lines.

없었다. 세포가 사멸하는 과정에서 생성되는 세포내 reactive oxygen species (ROS)의 변화를 확인하기 위하여 DCFH-DA 형광(FITC)을 이용한 FACS 분석을 실시하였다. 모든 세포주에서 분무액을 1%의 농도로 처리했을 때, DCFH-DA형광에 positive cell의 비율이 유의적으로 증가하지 않아서 세포사멸로 인한 세포 내 ROS의 증가가 없음을 확인하였다(Fig. 6).

결론적으로 공기살균기로부터 분무되는 염축매 전기분해 증기액(분무액)을 1%의 농도로 3종류의 인체 정상 세포주에 처리한 결과, 세포 생존율, 육안적 세포형태, 세포사멸관련 유전자의 mRNA level 및 세포내 ROS 생성 등 독성과 관련된 여러가지 평가에서 유의적인 변화가 관찰되지 않아서 개발된 염축매 전기분해 공기살균기는 인체에 안전한 것으로 판단되었다.

다중이용시설에서 공기살균기의 살균효능 평가

다중이용시설에서의 공기살균기의 효능 평가를 실시하기 위하여 한천 평판배지(LB, MacConkey, PDA)를 사용하여 낙하균들을 포집하고 배양한 후 공기 중 낙하균의 집락 수(CFU)를 분석하였다. Fig. 3과 같은 조건의 특정 사무실에 염축매 전기분해 공기살균기를 가동 전과 20시간 가동 후, 직경 90 mm의 LB (총세균류), MacConkey (대장균류)와 PDB (진균류) 배지를 총 5군데에 놓아두고 6시간 동안 낙하하는 균을 포집하였다. 공기살균기를 가동하기 전, 다중이용시설 내에 설치한 각각의 배지에서 총 세

균 수는 26±5 CFU, 대장균 수는 1±1 CFU, 진균 수는 2±1 CFU가 각각의 배지에 포집되었다. 한편 공기살균기를 20시간 가동한 후 6시간 동안 각각의 배지에 공기 중의 낙하균을 포집한 결과, 총 세균류는 3±1 CFU가 관찰되었으나 대장균류와 진균류는 관찰되지 않았다(Fig. 7).

따라서 다중이용시설 내 특정 장소에 개발된 염축매 전기분해 공기살균기를 설치하고 20시간을 가동한 결과, 공기 중의 총 세균 수는 89.4%, 대장균 수와 진균 수는 100.0%가 제거되어 공기살균기가 공기 중 오염 미생물(세균, 진균)에 대한 살균 효능으로 공기 중 오염 원인균이 제거되어 공기질을 개선하는 것으로 확인되었다.

감사의 글

이 연구는 부산대학교 기본연구지원사업 (2년)의 지원을 받아 수행되었습니다.

The Conflict of Interest Statement

The authors declare that they have no conflicts of interest with the contents of this article.

References

1. Bae, G. N. and Ji, J. H. 2013. Management policy and control technology for indoor air quality in Korea. *J. Korean Soc. Atmos. Environ.* **29**, 378-389.
2. Fatemeh, N., Mahboobeh, A., Amir, A., Mansour, S., Abed, Z. B., Younes, K., Hamed, E. L. and Aylin, E. 2021. Association of specific haplotype of tumor necrosis factor- α and interleukin-1 β polymorphisms with *Helicobacter pylori* infection and gastric carcinogenesis. *Germs.* **11**, 554-561.
3. Gu, H. B., Gwak, J. W. Oh, Y. S., Kim, S. J. and Kim, M. K. 2021. Development of air-conditioning filter manufacturing and photocatalyst formed technology. pp 15-23. *Korea Inst. Civil Eng. Build. Technol. (KICT)*. Gyeonggi-do, Republic of Korea.
4. Ha, D. H. 2021. A study on the use of hypochlorous acid generator sterilized water. *Proceedings of J. Korea Academia-Industrial Coop. Soc.* July 2-3. Jeju, Republic of Korea.
5. Hong, J. K. and Lim, G. Y. 2016. An experimental study on the air sterilization performance of a reflective electro magnetic energy system. *Korean J. Air-Cond. Refrig. Eng.* **28**, 509-514.
6. Huh, E. H., Won, D. G. and Moon, K. W. 2012. Trend in study of biological pollutants in indoor air quality in Korea. *J. Environ. Health Sci.* **38**, 300-310.
7. Jeon, B. H. and Hwang, I. Y. 2015. Concentrations of total culturable microorganisms and its identification in public facilities. *J. Korea Academia-Industrial Coop. Soc.* **16**,

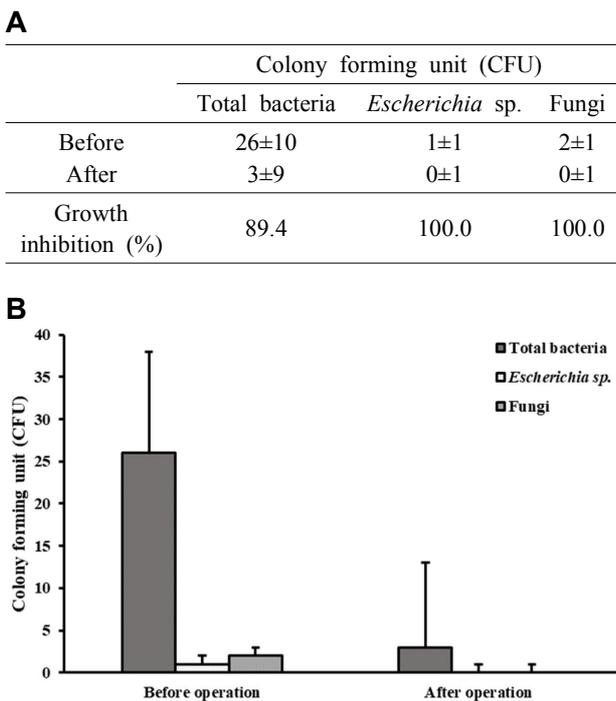


Fig. 7. Antimicrobial evaluation of air sterilizer operated by salt electrolytic catalyst in a test office room.

- 868-876.
8. Ju, J. H. and Park, C. G. 2022. Application of response surface methodology to optimize the performance of the electro-chlorination process. *J. Environ. Health Sci.* **48**, 167-175.
 9. Lee, Y. K. 2004. The method of indoor air quality process test. *Korean J. Air-Cond. Refrig. Eng.* **33**, 11-21.
 10. Mok, C. Y. and Song, D. M. 2010. Low-pressure plasma inactivation of *Escherichia coli*. *Food Eng. Prog.* **14**, 202-207.
 11. Na, J. H., Kim, T. Y., Cho, S. Y. and Kim, S. J. 2005. A study on sterilization of pathogenic bacteria using titanium dioxide photocatalyst. *Thr. Appl. Chem. Eng.* **11**, 2081-2084.
 12. Na, K. H., Son, J. S., Sung, K. J. and Jang, Y. K. 2005. Comparative efficiency evaluation of air cleaners for improving indoor air quality. *J. Environ. Impact Assess.* **14**, 109-115.
 13. Park, J. H., Ahn, K. C. and Ahn, J. K. 2000. Removal of air pollutants using photosensitizers/photocatalysts. *Korean J. Environ. Agric.* **19**, 284-293.
 14. Park, J. H., Yeom, B. Y. and Yoon, S. J. 2004. Progress and future direction of air purifier technology. *Korean J. Air-Cond. Refrig. Eng.* **33**, 27-30.
 15. Seo, J. H., Lee, D. J., Lee, M. K. and Oh, D. H. 2015. Studies on the antibacterial activity of wet-tissue saturated with electrolytic water of NaCl solution. *J. Korea TAPPI* **47**, 147-153.
 16. Keshtkar, S., Kaviani, M., Jabbarpour, Z., Geramizadeh, B., Motevaseli, E., Nikeghbalian, S., Shamsaefar, A., Motazedian, N., Al-Abdullah, I. H., Ghahremani, M. H. and Azarpira, N. 2019. Protective effect of nobiletin on isolated human islets survival and function against hypoxia and oxidative stress-induced apoptosis. *Sci. Rep.* **9**, 11701.
 17. Yoon, Y. H., Nam, S. H., Joo, J. C. and Ahn, H. S. 2014. Photocatalytic disinfection of indoor suspended microorganisms (*Escherichia coli* and *Bacillus subtilis* spore) with ultraviolet light. *J. Korea Academia-Industrial Coop. Soc.* **15**, 1204-1210.

초록 : 염색매 전기분해 공기살균기의 효능 평가

유선녕^{1*} · 전호연^{1*} · 김부경¹ · 김애리¹ · 정경일² · 전계록² · 안순철¹

(¹부산대학교 의과대학 미생물학 및 면역학 교실, ²㈜엑솔아이티 기술연구소)

최근 현대인들의 다중이용시설 사용 빈도가 증가하면서 실내 공기 질, 특히 실내공기 오염원인 공기매개 전염성 세균 및 바이러스 불안에 대한 관심이 높아져 다양한 형태의 공기청정기와 공기살균기의 보급이 확산되고 있다. 따라서 공기 내 미생물을 살균할 수 있는 기술에 대한 연구 필요성이 대두되고 있다. 본 연구에서는 염색매 전기분해 공기살균기를 개발하여 공기살균기의 항균활성과 인간 세포주(HaCaT, BEAS-2B, THP-1)에 대한 세포독성을 통한 안전성을 조사하였다. 공기살균기에서 분무되는 증기를 각각 1, 3시간 동안 분무한 결과, *Staphylococcus aureus*는 각각 24.01, 57.34%, *Bacillus subtilis*는 10.89, 57.76%, *Escherichia coli*는 30.79, 36.59%, *Pseudomonas aeruginosa*는 34.80, 49.51%, *Salmonella typhimurium*는 39.40, 73.98%, 진균인 *Candida albicans*는 36.59, 53.05%의 높은 항균활성을 보여 염색매 전기분해 공기살균기의 살균효능이 모든 종류의 시험균주에서 시간 의존적인 항균활성을 보였다. 공기살균기의 분무액을 0.1, 0.3, 1.0%의 농도로 처리하고 세포 생존율을 측정된 결과, 1.0%의 농도에서도 BEAS-2B 세포는 93.88%, HaCaT 세포는 97.01%, THP-1 세포는 86.56%로 관찰되어 인체 정상 세포주에서는 유의적인 세포독성을 나타내지 않았다. 또한 분무액을 1.0%의 농도로 처리하고 현미경으로 관찰한 세포주의 형태학적 변화, PCR을 이용한 세포사멸관련 유전자(Bcl-2, Bax)의 발현 분석, FACS를 이용한 세포 내 ROS의 생성 변화 등에서 분무액을 처리하지 않은 대조군과 비교하였을 때 유의적인 변화가 없었다. 따라서 시험균주에 대한 항균활성, 3가지의 인간 세포주에 대한 세포독성, 세포의 형태적 변화, 유독한 반응성 산소(ROS) 생성, 세포사멸관련 유전자의 발현 등에서 유의미한 변화가 확인되지 않아 공기살균기의 살균 효능과 사용상 안전성을 확인할 수 있었다. 최종적으로 다중이용시설에서의 공기살균기의 효능을 조사하기 위하여 밀폐된 실내에서 공기 살균기를 20시간 동안 가동한 후, 공기 중의 낙하균을 포집하여 배양한 결과, 총세균은 89.4%, 대장균과 진균은 100.0% 제거되는 것을 확인하였다. 결론적으로 개발된 염색매 전기분해 공기살균기는 인체에 대한 독성이 없으면서 실내 오염원인 미생물들을 효과적으로 제거할 수 있음을 확인하였다.