



과산화수소 공간소독기계를 사용한 카바페넴분해효소 생성 장내세균 및 반코마이신 내성 장알균 소독효과

이건영¹ · 강진영² · 최운영² · 이재희^{2,3} · 류남희⁴ · 현미리¹ · 김현아¹ · 이지연^{1,2}

계명대학교 동산병원 감염내과¹, 계명대학교 대구동산병원 감염관리실², 계명대학교 대구동산병원 진단검사의학과³, 계명대학교 동산병원 진단검사의학과⁴

Efficacy of Disinfection Using Activated Ionized Hydrogen Peroxide System for Carbapenemase-producing Enterobacterales and Vancomycin Resistant Enterococci

Keon Young Lee¹, Jin Young Kang², Un Young Choi², Jae Hee Lee^{2,3}, Nam Hee Ryu⁴, Miri Hyun¹, Hyun Ah Kim¹, Ji Yeon Lee^{1,2}

Department of Infectious Diseases, Keimyung University Dongsan Hospital¹, Infection Control Office², Department of Laboratory Medicine, Keimyung University Daegu Dongsan Hospital³, Department of Laboratory Medicine, Keimyung University Dongsan Hospital⁴, Daegu, Korea

Background: Multidrug-resistant pathogens such as carbapenemase-producing Enterobacterales (CPE) and vancomycin-resistant enterococci (VRE) are of concern in hospitals worldwide. Hydrogen peroxide sterilizer is one of the ‘no-touch’ disinfection systems. In this study, we aimed to confirm the efficacy of the activated ionized hydrogen peroxide (AIHP) system space sterilizer developed in South Korea.

Methods: Eighty sheets contaminated with CPE and VRE were placed in each room. The AIHP space sterilizer (MUGYUN, SUNGSAM, Korea) was used for sterilization. After the intervention, the mediums were incubated at 37°C for 24 h, and colony-forming units (CFUs) were analyzed.

Results: The median number of strains on the sheets before sterilization was 2.64×10^6 CFUs ($6.42 \log_{10}$ inoculum). The median \log_{10} reduction was 7.12 and 6.91 for CPE and VRE, respectively, after the intervention.

Conclusion: The AIHP space sterilizer developed in Korea was effective for the sterilization of VRE and CPE in the healthcare environment.

Key Words: Carbapenem-resistant enterobacteriaceae, Disinfection, Vancomycin-resistant enterococci

Received September 30, 2022

Revised February 6, 2023

Accepted February 15, 2023

Corresponding author: Ji Yeon Lee

E-mail: jirong84@dsmc.or.kr

ORCID:

<https://orcid.org/0000-0002-2788-1392>

Introduction

최근 Carbapenem-resistant Enterobacterales (카바페넴 내성 장내세균, CRE), Vancomycin-resistant enterococci (반코마이신 내성 장내세균, VRE) 등과 같은 다제내성균의 발생률이 전세계적으로 증가하고 있다

[1]. 미국에서 시행한 2012년부터 2017년까지의 다제내성균 발생률을 조사한 연구에서, VRE, Methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA), Carbapenem-resistant *Acinetobacter baumannii* (CRAB), Multidrug-resistant *Pseudomonas aeruginosa* (MDRPA) 감염의 발생률은 20.5%에서 39.2% 가량 감소하였으나, CRE 감염



의 경우 발생률의 큰 차이를 보이지 않았다[2]. 국내에서 2010년 12월 CRE가 처음으로 법정감염병으로 지정된 이후, 2017년 5,717건, 2018년 11,954건, 2019년 14,097건 등으로 신고건수가 증가하고 있다[2]. CRE는 혈류감염과 같은 침습적인 감염을 일으켜 40-50%에 가까운 높은 사망률을 보이며, 특히 Carbapenemase-producing Enterobacteriales (CPE)는 1996년 처음 보고된 이후 발생률이 지속적으로 증가하고 있다[3,4]. 또한 특히 VRE는 감염된 환자에서 사망률 증가와 입원기간의 연장과 연관이 있어 의료비용을 높이는 원인 중 하나이므로 접촉주의 및 공간소독을 통한 전파 예방이 중요하다[5,6]. 이와 같은 다제내성균은 주로 병원 내에서 접촉으로 인하여 발생 및 전파되었으나, 지역사회 감염으로도 전파될 수 있어 다제내성균에 대한 병원감염관리와 공간소독의 중요성이 지속적으로 강조되고 있다[3].

현재까지 국내외 의료기관에서 공간의 표면을 세척하고 소독제를 이용하여 소독하는 방법이 주로 사용되었으나, 이러한 환경관리의 효과에 대한 논쟁이 이어져왔다. 많은 시설에서 사람의 손으로 시행하는 공간 소독의 경우 표면의 40-50% 정도만이 소독이 제대로 이루어졌으며 시행하는 사람에 따라 소독의 결과가 달랐다[7,8]. 이처럼 사람의 손으로 시행하는 표면 소독은 오염원을 완전히 제거하는데 한계가 있기 때문에, 사람의 손이 닿지 않는 영역까지 소독을 시행하는 다양한 비접촉(no touch) 공간소독 방법이 개발되고 있다. 비접촉 공간소독 방법에는 과산화수소 공간소독, 자외선 공간소독, 오존가스 공간소독 등이 있고 각각의 멸균 효과에 대한 다양한 연구가 이루어지고 있다[9].

비접촉 공간소독 방법 중 과산화수소 공간소독의 방법으로 에어로졸 과산화수소(Aerosolized hydrogen peroxide, AHP) 공간소독 방법과 과산화수소 증기(Hydrogen peroxide vapor, HPV) 공간소독 방법이 주로 사용되어 왔다. 에어로졸 과산화수소 공간소독 방법은 인체 유해성은 적으나 멸균 효과가 다소 떨어진다는 특징이 있고, 과산화수소 증기 공간소독 방법은 멸균 효과는 좋으나 소독 공간의 온도, 습도, 면적 등의 변수에 따라 소독 효과가 상이할 수 있다는 단점이 있다[10,11]. 이에 따라 최근에는 플라즈마 상태의 활성 이온화 과산화수소(Activated Ionized hydrogen peroxide, AIHP)를 이용한 새로운 공간소독 방법이 개발되고 있다.

본 연구에서는 국내에서 개발된 활성 이온화 과산화수소 공간소독기계의 멸균 효과를 확인하고자 하였다.

Materials and Methods

1. 대상 균주 및 재료 선정

대상 균주는 본원에서 발생한 임상 검체 중 CPE와 VRE로 선정하였으며, CPE는 *Klebsiella pneumoniae* Carbapenemase (KPC) 생성 *Klebsiella pneumoniae* (*K. pneumoniae*)를 사용하였다. 페트리접시(petri dish) 한 쪽 면에 지름 8 cm인 원모양의 셀룰로스 아세테이트 재질의 시트지를 부착하여 소독을 시행하였다[12]. 액상배지(Phoenix™ ID Broth)의 탁도를 McFarland 5.0 standard로 맞춘 후 KPC 생성 *K. pneumoniae*와 VRE 균주를 준비하고, 10 µL (약 1.5×10^7 CFUs)를 멸균 플라스틱 스프레더를 이용하여 시트지에 고르게 퍼발랐다.

이 외 과산화수소 멸균효과 확인을 위하여 생물학적 지시제(Biological indicator, BI, Apex Biological indicator for gaseous hydrogen peroxide, Purple releasat® culture media)를 사용하여 멸균 후 아포(Spore)의 사멸 여부를 확인하였다.

2. 연구 장소 선정 및 방법

격리병실 두 곳을 지정하여 실험을 진행하였다. 병실의 면적은 가로 3 m, 세로 5 m, 높이 2.5 m (37.5 m³)이었다. 공간소독기계의 뒤쪽이나 화장실 안 등의 취약 예상 구역 및 필수 구역을 선정하여 대상 균주를 바른 시트지가 부착된 페트리접시를 각각 병실 내 10개의 평가 장소에 부착하였다. 생물학적 지시제(Biological indicator, BI)는 띠(strip)를 보호용 주머니에서 꺼내 포자가 접촉되지 않은 말단에 테이프를 이용하여 같은 병실 내 3개의 다른 평가 장소에 부착하였다(Fig. 1).

과산화수소 공간소독기계는 활성 이온화 과산화수소(Activated Ionized Hydrogen Peroxide, AIHP) 공간소독기계(MUGYUN, SUNGSAM, Korea)를 사용하였다. 활성 이온화 과산화수소 공간소독기계를 병실 내 위치시킨 후 플라즈마 Arc 작동 여부를 확인하였다. 기계의 과산화수소 용액 농도는 7.8%로 사용하였고, 사용 전 용액 종류, 농도 및 질량을 측정하였다. 소독을 시행할 공간의 가로, 세로, 높이 값을 입력하면 자동으로 소독 시간 및 과산화수소 용액 사용량을 계산 후 공간 소독 시행하였다. 과산화수소 용액이 병실 밖으로 확산되는 것을 막고 소독 효과를 높이기 위하여 병실 내 모든 창문과 공조 입구를 테이프로 밀

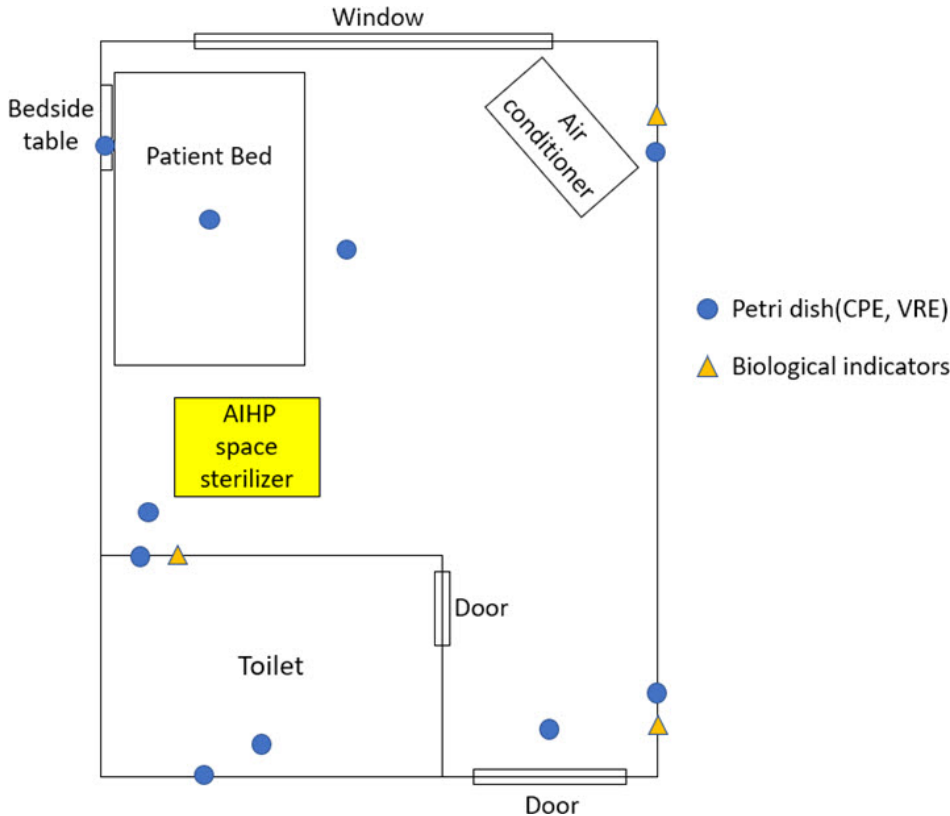


Fig. 1. Design of room showing positioning of AIHP space sterilizer, petri dishes and biological indicators. Abbreviations: AIHP, Activated Ionized Hydrogen Peroxide; CPE, Carbapenemase-producing Enterobacteriales; VRE, Vancomycin-resistant enterococci.

봉하였다. 기계 작동버튼을 누른 후 5분 뒤에 시작할 수 있도록 설정한 후 병실 밖으로 모든 사람들이 나간 이후 출입문을 닫고 밀봉하였다. 소독은 1시간 30분간 시행하였고, 활성 이온화 과산화수소 공간소독기계 작동을 종료한 후 1시간 동안 환기하였다. 이후 병실 내 과산화수소 농도를 측정하여 1.0 ppm 이하로 확인된 이후 대상 균주를 바른 페트리접시와 생물학적 지시제를 수거하였다. 이러한 과정을 각 병실에서 2회씩, 총 4회차에 걸쳐 반복 시행하였다.

3. 공간소독 효과 평가

1) 공간소독 후 페트리접시의 잔여 균주 확인을 위한 배양
공간소독 전 시트지에 남아있는 균주 수 평가는 동일 균주를 시트지에 펴 바른 다음, 바른 후부터 소독까지의 시간(약 30분)이 지난 후 전용 배지(TSA-R(L), BANDIO, Korea)에 전용 어플리케이션(APP Count-Tact, bioMerieux, France)로 압력을 가해 눌러 24시간 동안 배양하였다.

공간소독 후 페트리접시에 부여된 번호와 같은 번호로 배지에 번호를 기입하였다. 번호에 따라 전용 어플리케이션에 전용 배지를 끼워 지름 8 cm의 페트리접시의 시트지

가 붙은 면에 10초 동안 500 ± 50 g 압력으로 눌러 24시간 동안 37°C 에서 배양하였고, 배양 후 남아있는 균주 수를 계산하였다. 공간소독 후 페트리접시에 배양된 균주 수를 확인하였고, 소독 전후 평균적으로 감소된 비율을 측정하여 상용로그 감소(\log_{10} reduction)로 계산하였다. 소독 전후 감소된 비율을 측정하여 AIHP 공간소독기계의 오염 제거 효과를 확인하였다.

2) 공간소독 후 생물학적 지시제의 잔여 아포확인을 위한 배양

공간 소독 후 액체배지의 뚜껑을 열고 부착되어 있는 생물학적 지시제를 입구에 살짝 넣은 후 포자가 접종된 부분을 포함한 띠의 끝 부분을 멸균 가위로 잘라 접종하여 회수하여 배양을 진행하였다. *Geobacillus starothermophilus*의 생물학적 지시제는 접종 후 $55\text{--}60^\circ\text{C}$ 에서 7일간 배양하였다. 배양 후 7일째 생물학적 지시제의 배양 여부를 색 변화를 통해 평가하였다.

Results

소독 작업 전 실제 시트지에 남아있는 균주 수는 Mac-

Farland 5.0 10 μL (1.5×10^7 CFUs)의 17.6%로 2.64×10^6 CFUs ($6.42 \log_{10}$ inoculum)였다. 공간소독 후 배양된 평균 CFU 수는 CPE의 경우 2 CFU/회차로 확인되었고, 이는 하나의 페트리접시에서 배양된 CFU수로 계산하였을 때 0.2 CFU/plate ($-0.7 \log_{10}$ inoculum)로 확인되었다. 소독 전과 비교하였을 때 $7.12 \log_{10}$ reduction를 확인하였다. VRE의 경우 소독 후 3.25 CFU/회차, 0.325 CFU/plate ($-0.49 \log_{10}$ inoculum)가 배양됨을 확인하여, 소독 전후 $6.91 \log_{10}$ reduction를 확인하였다(Table 1, 2).

공간소독 후 생물학적 지시제의 배양 결과를 통하여 과산화수소의 멸균 효과를 판단하였다. 생물학적 지시제의 배양 후, 배양액의 색상이 노란색으로 변하면 아포가 살아있음을 나타내고(양성, positive result), 색상의 변화가 없이 보라색을 유지(음성, negative result)하고 있으면 99.9999% 이상 멸균이 완료됨을 뜻한다. 소독 후 생물학

적 지시제 배양액 색의 변화를 관찰하였고, 4회차 모두에서 모든 생물학적 지시제 배양액 색이 보라색으로 지속됨을 확인하였다. 이를 통해 과산화수소 공간소독을 통한 생물학적 지시제 아포의 사멸을 확인하였다.

Discussion

비접촉 공간소독 방법 중 대표적인 방법으로 자외선 공간소독과 과산화수소 공간소독이 있다. 그 중 과산화수소 공간소독은 여러 연구를 통해 *Clostridium difficile*, MRSA, CRE, VRE, Acinetobacter 등의 다양한 오염원에 대한 공간소독 효과가 확인되었고, 최근에는 CPE 및 에볼라 바이러스(Ebola virus), SARS-CoV-2 바이러스 등에 대한 소독 효과 연구가 이루어지고 있다[9,13-16]. 또한 다른 공간소독 방법과의 효과 차이를 비교하는 연구도 다양하게 시행되고 있다. 과산화수소 공간소독기체는 과산

Table 1. Colony-forming unit counts of CPE after sterilization by AIHP space sterilizer

Sheet No.	1st	2nd	3rd	4th	Total
1	0	0	0	0	0
2	1	1	0	0	2
3	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0
6	0	5	1	0	6
7	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0
Total	1	6	1	0	

Abbreviations: CPE, Carbapenemase-producing Enterobacteriales; AIHP, Activated Ionized Hydrogen Peroxide.

Table 2. Colony-forming unit counts of VRE after sterilization by AIHP space sterilizer

Sheet No.	1st	2nd	3rd	4th	Total
1	0	0	0	0	0
2	0	4	0	0	4
3	0	1	1	0	2
4	0	0	1	0	1
5	0	0	2	0	2
6	0	1	1	0	2
7	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0
9	0	0	0	1	1
10	0	1	0	0	1
Total	0	7	5	1	

Abbreviations: VRE, Vancomycin-resistant enterococci; AIHP, Activated Ionized Hydrogen Peroxide.

화수소 증기를 분사하기 때문에 공조를 차단하고 창문 및 출입문을 밀봉해야 하며, 적용 후에 병실 내 과산화수소 농도가 1 ppm 이하로 떨어지도록 1-2시간 정도 환기가 필요하다. 자외선 공간소독기계는 공조 차단이나 밀봉 절차는 필요하지 않으나 의료기기 및 가구 등으로 인해 그늘진 곳이 있어 직접적으로 자외선을 쬐지 못하는 공간의 경우에는 소독이 어려운 점이 있다. 과산화수소 공간소독과 자외선 공간소독의 효과를 비교한 한 연구에서, 과산화수소 공간소독은 평균 50.71%의 멸균 효과를 보였으나, 자외선 공간소독은 일반 영역에서는 평균 96.75%, 그림자가 지는 영역에서는 평균 4.95%의 멸균 효과의 차이를 보였다. 따라서 의료기기 및 가구의 배치에 따라 공간소독 방법을 결정하는 것이 필요하겠다[12,17].

과산화수소 공간소독 방법 중 에어로졸 과산화수소 공간소독 방법은 5-6%의 저농도 과산화수소를 단일방향의 노즐을 통해 분사하는 방법으로, 인체 유해성이 적다는 장점이 있으나 좁은 공간에서 효과적이며, 대상 균주에 따른 차이는 있으나 여러 연구들을 통해 대개 4 log₁₀ reduction 이상의 멸균 효과를 기대하기 어려움을 확인하였다[10,11,18,19]. 반면 과산화수소 증기 공간소독 방법은 30-35%의 고농도 과산화수소를 가열하여 증기로 분사하는 방법으로 인체 유해성이 높고 온도 및 습도에 따라 효과가 달라질 수 있으며, 의료 환경 표면의 부식 문제가 생길 수 있다는 단점이 있다. 그러나 멸균 효과를 확인한 다양한 연구에서 평균적으로 6 log₁₀ reduction 이상의 멸균 효과를 확인할 수 있었다[10,11,18-23]. 두 가지 과산화수소 공간소독 방법이 각각 상이한 장단점을 가짐에 따라 이 두 가지 방법의 장단점을 보완한 방법으로 플라즈마 상태의 과산화수소를 이용한 활성 이온화 과산화수소 공간소독 방법이 개발되어 연구되고 있다. 플라즈마를 통해 이온, 전자, 전기장, 자외선 등을 발생시켜 소독 효과를 가지게 되고, 특히 활성화 이온인 O, OH, NO₂ 등을 통해 멸균 효과를 가진다. 또한 사용되고 남은 과산화수소 기체를 수증기와 산소로 환원시켜 무독성으로 바꾼다. 2019년 한 연구에서는 12% 농도의 플라즈마를 이용하였을 때 6 log₁₀ reduction 이상의 멸균 효과를 확인하였다[24,25].

미생물 멸균 효과에 대한 기준은 미국 EPA (Environmental Protection Agency) 가이드라인에서 대상 균주 및 소독제의 종류에 따라 권장하는 유효 log₁₀ reduction 기준치는 조금의 차이는 있으나, 현재까지 이루어진 다양한 연구들을 통해 과산화수소 공간소독기계에 대해 6 log₁₀ reduction 이상의 멸균 효과를 기대하고 있다. 또한 국내

식품의약품안전처의 의료기기 멸균성능 평가 가이드라인에서 멸균 보증 수준(SAL, Sterility Assurance Level)은 멸균 후 미생물이 존재하는 확률로 최소 10⁻⁶의 개체 수 사멸을 멸균 보증 수준으로 설정하고 있다[10,11,24-26]. 본 연구에서는 최근 국내에서 개발된 7.8% 저농도 과산화수소를 이용한 활성 이온화 과산화수소 공간소독기계의 멸균 효과를 평가하였으며, VRE와 CPE 모두에서 6 log₁₀ reduction 이상의 균주 감소 효과를 보여 과산화수소 공간소독기계로서 충분한 멸균 효과를 확인할 수 있었다.

본 연구는 의료기관 내 다제내성균 중 CPE와 VRE 균주로 오염된 의료환경에서의 활성 이온화 과산화수소 공간소독기계의 충분한 멸균 효과를 확인한 것에 의의가 있다. 또한 기존의 과산화수소 공간소독기계는 외국에서 생산하여 수입되고 있는 상태로 고비용으로 인해 의료기관에서 쉽게 적용하기 어려운 단점이 있었다. 그러나 본 연구에서 사용된 기계는 국내에서 생산되어 기존의 과산화수소 공간소독기계의 단점인 비용적인 측면에서의 접근성을 개선 가능한 면이 있으며 의료기관 내에서도 좀 더 폭넓게 사용할 수 있겠다.

본 연구의 제한점은 단일 기관의 제한된 공간에서 실험이 시행되었고, 실제 다제내성균주 보균 환자에 의해 오염된 환경이 아닌 대상 균주를 바른 시트지를 이용하였다는 점이다. 추후 다기관에서 다양한 환경 및 표면재질에 따른 균주 감소 효과를 평가하는 것이 추가 연구로 필요하겠다.

국내에서 개발된 활성 이온화 과산화수소 공간소독기계는 VRE와 CPE로 오염된 의료환경에서 이전 다른 연구에서 사용된 과산화수소 공간소독기계와 마찬가지로 효과적인 공간 멸균 효과를 확인하였으며 앞으로 국내 의료환경에서 공간소독을 위해 적용할 수 있기를 기대한다.

Acknowledgements

본 연구는 보건복지부의 재원으로 한국보건산업진흥원의 보건의료기술연구개발사업 지원에 의하여 이루어진 것임(HW20C2177).

References

1. Nordmann P, Naas T, Poirel L. Global spread of Carbapenemase-producing Enterobacteriaceae. *Emerg Infect Dis* 2011;17:1791-8.
2. Jernigan JA, Hatfield KM, Wolford H, Nelson RE, Olubajo B, Reddy SC, et al. Multidrug-resistant bacterial infections in U.S. hospitalized patients, 2012-2017. *N*

- Engl J Med 2020;382:1309-19.
3. Centers for Disease Control and Prevention (CDC). Facility guidance for control of carbapenem-resistant enterobacteriaceae (CRE). <https://www.cdc.gov/hai/pdfs/cre/CRE-guidance-508.pdf> (Updated on November 2015).
 4. Yigit H, Queenan AM, Anderson GJ, Domenech-Sanchez A, Biddle JW, Steward CD, et al. Novel carbapenem-hydrolyzing beta-lactamase, KPC-1, from a carbapenem-resistant strain of *Klebsiella pneumoniae*. *Antimicrob Agents Chemother* 2001;45:1151-61. Erratum in: *Antimicrob Agents Chemother* 2008;52:809.
 5. Cheah AL, Spelman T, Liew D, Peel T, Howden BP, Spelman D, et al. Enterococcal bacteraemia: factors influencing mortality, length of stay and costs of hospitalization. *Clin Microbiol Infect* 2013;19:E181-9.
 6. Frakking FNJ, Bril WS, Sinnige JC, Klooster JEV, de Jong BAW, van Hannen EJ, et al. Recommendations for the successful control of a large outbreak of vancomycin-resistant *Enterococcus faecium* in a non-endemic hospital setting. *J Hosp Infect* 2018;100:e216-25.
 7. Goodman ER, Platt R, Bass R, Onderdonk AB, Yokoe DS, Huang SS. Impact of an environmental cleaning intervention on the presence of methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* and vancomycin-resistant enterococci on surfaces in intensive care unit rooms. *Infect Control Hosp Epidemiol* 2008;29:593-9.
 8. Carling PC, Bartley JM. Evaluating hygienic cleaning in health care settings: what you do not know can harm your patients. *Am J Infect Control* 2010;38(5 Suppl 1):S41-50.
 9. Boyce JM. Modern technologies for improving cleaning and disinfection of environmental surfaces in hospitals. *Antimicrob Resist Infect Control* 2016;5:10.
 10. Otter JA, Yezli S, Perl TM, Barbut F, French GL. The role of 'no-touch' automated room disinfection systems in infection prevention and control. *J Hosp Infect* 2013;83:1-13.
 11. Otter JA, Yezli S, Perl TM, Barbut F, French GL. A guide to no-touch automated room disinfection (NTD) systems. In: Walker JT, ed. *Decontamination in hospitals and healthcare*. Cambridge; Woodhead Publishing, 2014:413-60.
 12. Park SY, Lee JY, Kim EJ, Kwak SH, Hong MJ, Lim YJ, et al. Comparison of the microbiological efficacy of disinfection using ultraviolet and hydrogen peroxide system for carbapenemase-producing *Enterobacteriaceae* in a healthcare setting. *Korean J healthc assoc Infect Control Prev* 2021;26:31-8.
 13. Weber DJ, Rutala WA, Anderson DJ, Chen LF, Sickbert-Bennett EE, Boyce JM. Effectiveness of ultraviolet devices and hydrogen peroxide systems for terminal room decontamination: focus on clinical trials. *Am J Infect Control* 2016;44(5 Suppl):e77-84.
 14. Truitt CL, Runyan DA, Stern JJ, Tobin C, Goldwater W, Madsen R. Evaluation of an aerosolized hydrogen peroxide disinfection system for the reduction of *Clostridioides difficile* hospital infection rates over a 10 year period. *Am J Infect Control* 2022;50:409-13.
 15. Ali S, Muzslay M, Bruce M, Jeanes A, Moore G, Wilson AP. Efficacy of two hydrogen peroxide vapour aerial decontamination systems for enhanced disinfection of methicillin-resistant *Staphylococcus aureus*, *Klebsiella pneumoniae* and *Clostridium difficile* in single isolation rooms. *J Hosp Infect* 2016;93:70-7.
 16. Christie-Holmes N, Tyli R, Budyłowski P, Guvenc F, Weiner A, Poon B, et al. Vapourized hydrogen peroxide decontamination in a hospital setting inactivates SARS-CoV-2 and HCoV-229E without compromising filtration efficiency of unexpired N95 respirators. *Am J Infect Control* 2021;49:1227-31.
 17. Kelly S, Schnugh D, Thomas T. Effectiveness of ultraviolet-C vs aerosolized hydrogen peroxide in ICU terminal disinfection. *J Hosp Infect* 2022;121:114-9.
 18. Holmdahl T, Lanbeck P, Wullt M, Walder MH. A head-to-head comparison of hydrogen peroxide vapor and aerosol room decontamination systems. *Infect Control Hosp Epidemiol* 2011;32:831-6.
 19. Fu TY, Gent P, Kumar V. Efficacy, efficiency and safety aspects of hydrogen peroxide vapour and aerosolized hydrogen peroxide room disinfection systems. *J Hosp Infect* 2012;80:199-205.
 20. Otter JA, French GL. Survival of nosocomial bacteria and spores on surfaces and inactivation by hydrogen peroxide vapor. *J Clin Microbiol* 2009;47:205-7.
 21. Otter JA, Yezli S, French GL. Impact of the suspending medium on susceptibility of methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* to hydrogen peroxide vapour decontamination. *J Hosp Infect* 2012;82:213-5.
 22. Otter JA, Yezli S, Schouten MA, van Zanten AR, Houmes-Zielman G, Nohlmans-Paulssen MK. Hydrogen peroxide vapor decontamination of an intensive care unit to remove environmental reservoirs of multidrug-resistant gram-negative rods during an outbreak. *Am J Infect Control* 2010;38:754-6.
 23. Lemmen S, Scheithauer S, Häfner H, Yezli S, Mohr M, Otter JA. Evaluation of hydrogen peroxide vapor for the inactivation of nosocomial pathogens on porous and non-porous surfaces. *Am J Infect Control* 2015;43:82-5.
 24. Freyssenet C, Karlen S. Plasma-activated aerosolized hydrogen peroxide (aHP) in surface inactivation procedures. *Appl Biosaf* 2019;24:10-9.
 25. Choi J, Lee M, Lee Y, Song Y, Cho Y, Lim TH. Effectiveness of plasma-treated hydrogen peroxide mist disinfection in various hospital environments. *Int J Environ Res Public Health* 2021;18:9841.
 26. National Institute of Food and Drug Safety Evaluation. Guideline for safety and sterilization performance evalu-

ation of low-temperature sterilizer medical devices.
https://www.mfds.go.kr/brd/m_1060/view.do?seq=12637&srchFr=&srchTo=&srchWord=&srchTp=&itm_

[seq_1=0&itm_seq_2=0&multi_itm_seq=0&company_cd=&company_nm=&page=82](#) (Updated on 11 January 2017).