



Received: 2026/01/28
Revised: 2026/02/06
Accepted: 2026/03/17
Published: 2026/03/31

***Corresponding Author:**

Daesoo Kim

69-37, Sinheungmal-gil, Seocho-gu, Seoul, 06796,
Republic of Korea

Tel: +82-2-2008-6530

E-mail: kds00322@gmail.com

해군 함정 내 생물학 에어로졸 확산 억제를 위한 환기 및 압력제어 기반 적용 방안

Ventilation- and Pressure-Based Strategies for Mitigating Biological Aerosol Spread in Naval Ships

유진¹, 김유리², 전형린², 이효수², 오자윤², 김대수^{3*}

¹육군 소령/국군화생방방호사령부 화생방방어연구소 생물분석과 미생물연구장교

²국군화생방방호사령부 화생방방어연구소 생물분석과 생물연구담당

³육군 중령/국군화생방방호사령부 화생방방어연구소 생물분석과 생물분석과장

Jin Yoo¹, Yu-Ri Kim², Hyoung-Rin Jeon², Hyosu Lee², Jayun Oh², Daesoo Kim^{3*}

¹Maj., ROK Army/Microbialorganism Research Officer, Biological Department, CBRN Defense Research Institute, ROK National Defense

²Biological Research Officer, Biological Department, CBRN Defense Research Institute, ROK National Defense

³LTC, ROK Army/Head of Biological Department, CBRN Defense Research Institute, ROK National Defense

Abstract

본 연구는 문헌 분석을 통해 함정 내부에서의 생물학 에어로졸 확산 특성과 기존 환기 개념의 제약을 고찰하고, 내부 확산 억제를 목표로 하는 환기 및 압력 제어 기반 적용 방안을 제시한다. 제안된 개념은 구획 기반 존 설정, 인접 구획 간 수 파스칼(Pa) 수준의 미세 압력 위계를 전제로 한 단계적 압력 제어, 그리고 생물학 위협 단계에 따른 적응적 환기 운용을 통해 임무 핵심 구역 보호와 작전 지속성 유지를 지향한다. 본 논문은 신규 장비 도입이나 구조 변경 없이 기존 환기 인프라를 활용하여 적용 가능한 해군 함정 생물학 방호 개념의 기초 틀을 제공한다.

This paper analyzes the dispersion behavior of biological aerosols within naval ship environments and examines the limitations of conventional ventilation-based chemical, biological, radiological, and nuclear (CBRN) protection concepts. It proposes an application-oriented framework that prioritizes suppression of internal dispersion through compartment-based zoning, a staged pressure hierarchy with small inter-compartment pressure differentials on the order of several pascals (Pa), and ventilation operation that adapts to assessed biological threat levels. The proposed approach enhances protection of mission-critical spaces and operational continuity by utilizing existing ventilation infrastructure without structural modification or additional hardware.

Keywords

생물학 에어로졸(Biological Aerosol),
환기 제어(Ventilation Control),
압력 구획화(Pressure Zoning),
에어로졸 확산(Aerosol Dispersion),
구획화(Compartmentalization)

Acknowledgement

본 연구는 국군화생방방호사령부 예하 국군화생방방어연구소에서 수행된 연구 결과임.

1. 서론

해군 함정은 다수의 구획이 통로, 환기 덕트, 출입 해치를 통해 밀집되고 복합적으로 연결된 고도로 제약된 내부 환경에서 운용된다. 이러한 구조적 특성으로 인해 공중 위협이 함정 내부로 유입될 경우, 초기 유입 지점을 넘어 단시간 내에 다수의 구획으로 확산될 가능성이 크다. 따라서 공중 위협에 대한 효과적인 방호는 해군 함정의 생존성과 승조원 안전을 확보하는 데 있어 핵심적인 요소라 할 수 있다[1].

그동안 해군의 화생방(CBRN) 방호 체계는 화학 및 방사능 위협을 중심으로 기술적·운용적 발전을 이루어 왔다. 함정 탑재 탐지 체계, 보호 태세, 환기 제어 개념 역시 주로 즉각적이고 급성 위협을 초래하는 화학작용제 증기나 방사성 오염에 대응하는 방향으로 발전해 왔다. 그러나 생물학적 위협은 이러한 기존 가정과는 물리적 특성과 운용적 함의 측면에서 근본적인 차이를 가진다. 생물학적

용제는 기체가 아닌 입자 형태의 에어로졸로 분산되며, 노출 이후 즉각적인 증상이 나타나지 않는 경우가 많아 초기 인지와 대응이 특히 어렵다[2-4].

역사적으로 해군에서의 생물학 위협 대응은 노출 이후 조치에 중점을 두어 왔다. 의무 감시, 역학적 평가, 그리고 육상에서 수행되는 실험실 기반 확진이 주요 대응 수단으로 활용되어 왔으며[5,6], 이러한 접근은 진단과 장기적 대응 측면에서는 필수적이다. 그러나 생물학 에어로졸이 함정 내부환경으로 유입된 직후 발생하는 초기 확산을 관리하는 데에는 제한적인 역할만을 수행해 왔다. 그 결과, 생물학 에어로졸이 환기 시스템과 상호 연결된 구획을 통해 어떻게 이동하고 확산되는지에 대한 체계적인 분석은 상대적으로 충분한 주목을 받지 못하였다.

함정의 내부 구조는 생물학 오염 통제 측면에서 고유한 도전 과제를 제시한다. 다층 갑판 구조, 협소한 통로, 그리고 공유된 환기 네트워크는 복잡한 공기 흐름 패턴을 형성하며, 이는 에어로졸화된 입자의 구획 간 이동을 촉진할 수 있다[7-9]. 화학작용제 증기가 주로 대류 흐름을 따라 이동하는 것과 달리, 생물학 에어로졸은 입자 크기 분포, 중력 침강, 표면 침적, 그리고 인적 활동이나 기계적 진동에 의한 재부유와 같은 추가적인 요인의 영향을 받는다[2,10,11]. 이러한 특성은 화학작용제를 기준으로 개발된 기존 대응 전략이 생물학 오염 상황에 그대로 적용되기 어렵다는 점을 시사한다.

환기 및 압력 제어 시스템은 해군 함정에서 생물학적 위협을 관리할 수 있는 가장 즉각적이고 영향력 있는 수단 중 하나이다. 공기 흐름의 방향, 유량, 그리고 구획 간 압력 차를 조절함으로써 에어로졸 확산 경로에 직접적인 영향을 미칠 수 있다[12,13]. 그러나 기존 함정 환기 제어 개념은 주로 열 환경 조절, 연기 관리, 또는 화학작용제 증기 격리를 목적으로 설계되어 왔으며, 생물학 에어로졸의 입자 기반 거동을 명시적으로 반영한 사례는 제한적이다[14-16]. 이는 현행 해군 CBRN 방호 체계 내에 개념적 공백이 존재함을 의미한다.

본 논문은 이러한 공백을 해소하기 위해 해군 함정 내부에서의 생물학 에어로졸 확산을 개념적이고 적용 지향적인 관점에서 분석한다. 실험적 검증이나 수치 시뮬레이션을 제시하기보다는, 함정 환경에서의 생물학 오염 확산 특성을 고찰하고 실질적인 대응 수

단으로서 환기 및 압력 제어 기반의 관리 전략을 제안하는 데 초점을 둔다. 특히 기존 해군 CBRN 체계와의 운용적 연계 가능성을 강조함으로써, 함정 내부 오염 관리를 위한 구조화된 개념적 틀을 제시하고자 한다. 본 연구는 이를 통해 해군 작전 환경에서 보다 포괄적이고 회복력 있는 생물학 방호 개념의 발전에 기여하고자 한다.

2. 해군 함정에서의 생물학 에어로졸 확산 특성

2.1 해군 함정의 구조적·환경적 특성

해군 함정은 다양한 위협 환경에서도 생존성과 임무 지속성을 유지하기 위해 밀폐되고 구획화된 시스템으로 설계되어 있다[17,18]. 미 해군 CBRN 교리 및 기술 매뉴얼에 따르면, 함정의 집단 방호 체계는 구획 간 공기 질과 압력 차를 제어하기 위해 기계식 환기 및 여과 시스템에 크게 의존한다[19]. 자연 침기와 배기가 공기 교환에 일정 부분 기여할 수 있는 육상 구조물과 달리, 해군 함정은 특히 CBRN 방호 태세가 발령될 경우 대부분 밀폐된 상태로 운용된다.

기존 연구와 해군 CBRN 체계에 대한 기술적 개요에서는 환기 시스템이 단순한 환경 제어 수단을 넘어, 화학 및 방사능 사고 시 방호 기능을 수행하는 함정 생존성의 핵심 구성 요소임을 강조하고 있다. 그러나 이러한 환기 시스템은 동시에 갑판과 구획 전반에 걸쳐 상호 연결된 공기 흐름 경로를 형성한다. Beth-El Industries 및 Heinen & Hopman 등 미 해군 CBRN 솔루션 제공업체의 공기 처리 시스템 사례는 중앙 집중식 여과 장치가 여러 구역으로 공기를 분배하는 구조를 보여주며, 적절한 관리가 이루어지지 않을 경우 공중 오염 물질의 구획 간 이동을 촉진할 수 있음을 시사한다.

함정 내부의 공기 흐름 역학은 운용 요인에 의해 더욱 복잡해진다. 승조원의 이동, 추진 및 보조 장비에서 발생하는 진동, 그리고 일상적인 함정 활동은 국지적인 공기 흐름을 지속적으로 교란한다. 이러한 동적 환경은 함정을 정적인 건축물 환경과 구별 짓는 요소로, Fig. 1과 같이 다층 갑판 구조와 상호 연결된 구획, 환기 덕트로 구성된 함정 내부에서는 공중 오염 물질의 거동이 단순한 정상 상태 가정만으로는 충분히 설명되기 어렵다는 점을 보여준다.

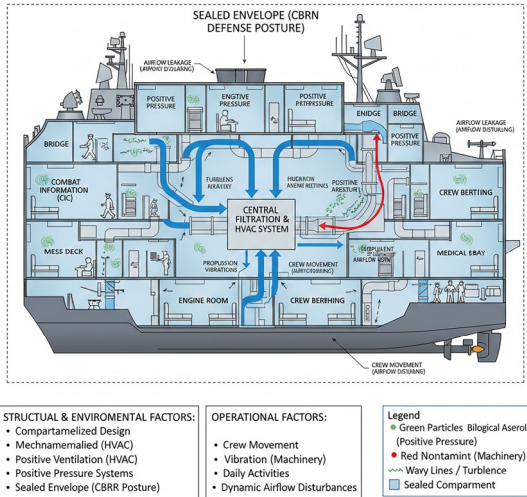


Fig. 1. Characteristics of naval ship compartments

2.2 밀폐된 함정 환경에서의 생물학 에어로졸 물리적 거동

생물학 에어로졸은 미생물 또는 생물학적 물질을 포함한 공중 부유 입자로 구성되며, 그 거동은 주로 입자 크기와 주변 공기 흐름 조건에 의해 결정된다. 항공생물학 분야에서는 에어로졸 입자의 거동을 공기역학적 직경(aerodynamic diameter)을 기준으로 설명하며, 이는 입자가 공기 흐름과 중력의 영향을 받는 방식을 규정하는 지표로 활용된다. 생물학작용제와 관련된 에어로졸은 일반적으로 수백 나노미터에서 수 마이크로미터 범위에 분포하여, 공기 중 장시간 부유하면서 환기 시스템을 통해 이동할 수 있는 특성을 가진다.

미세 입자($\approx 1 \mu\text{m}$ 이하)는 공기 흐름을 거의 그대로 따라 이동하며 환기 덕트와 인접 구획으로 쉽게 확산된다. 반면, 수 마이크로미터 범위의 입자는 부유와 침강이 동시에 발생하여 여러 구획을 통과한 이후 내부 표면에 침적될 수 있다. 이러한 침적은 제거를 의미하지 않으며, 실내 생물 에어로졸 연구에 따르면 침적된 입자는 인적 활동이나 기계적 진동에 의해 재부유될 수 있다. 해군 함정 환경에서는 승조원 이동, 장비 운용, 추진 시스템에서 발생하는 진동이 이러한 재부유를 반복적으로 유발할 수 있다.

밀폐되고 기계식 환기에 의존하는 함정 내부 환경에서는 분자 확산보다 공기 흐름에 의한 수송이 에어로졸 이동을 지배한다. 환기 덕트 구조와 구획 간 압력 차에 의해 형성된 공기 흐름은 생물학 에어로졸을

특정 경로를 따라 우선적으로 이동시키며, 상호 연결된 구획은 균일한 혼합 공간이 아니라 네트워크 형태로 거동한다. 그 결과 동일한 환기 조건에서도 구획별 오염 수준은 현저한 차이를 보일 수 있다. 이러한 특성은 Fig. 2와 같이, 밀폐되고 기계식 환기에 의존하는 함정 내부에서는 생물학 에어로졸이 공기 흐름을 따라 우선적으로 이동하며, 구획 간 압력 관계에 따라 비균질적인 분포를 형성한다. 이는 함정 내부에서의 생물학 에어로졸 거동이 단순 확산이 아닌 동적 수송 문제임을 의미한다. 따라서 생물학 오염 대응에서 환기 및 압력 제어는 오염 제거 수단을 넘어, 구획 간 확산을 제한하기 위한 핵심 관리 요소로 고려될 필요가 있다.

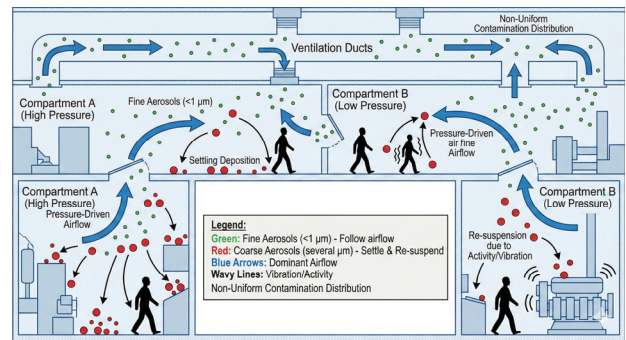


Fig. 2. Physical behavior of biological aerosols in sealed naval ship environments

2.3 생물학 에어로졸과 화학작용제 확산의 차별성

해군 CBRN 대응 체계는 전통적으로 화학작용제를 기체 기반 위협으로 간주해 왔으며, 이들의 확산은 주로 대류 흐름과 분자 확산에 의해 지배된다고 가정해 왔다. 이러한 전제는 화학작용제가 비교적 균질한 기체 거동을 보이며, 환기 차단, 여과, 또는 강제 배출과 같은 공기 제어 조치를 통해 예측 가능하게 관리될 수 있다는 인식에 기반한다. 실제로 합동 군사 교리와 의무 참고 문헌에서도 화학 위협 대응의 핵심으로 신속한 탐지, 오염 구역의 격리, 그리고 환기 및 여과를 통한 제거를 강조하고 있다.

그러나 생물학 에어로졸은 이러한 기체 중심 확산 가정과는 근본적으로 다른 물리적 거동 특성을 나타낸다. 생물학작용제는 일반적으로 수 마이크로미터 이하의 입자 형태로 공기 중에 부유하며, 공기 흐름을 따라 이동하는 동시에 중력 침강, 표면 침적, 그리고

재부유와 같은 입자 특유의 과정을 반복적으로 겪는다. 이로 인해 생물학 에어로졸의 이동은 단순한 확산 문제가 아니라, 환기 구조, 압력 구배, 그리고 내부 표면과의 상호작용이 결합된 복합적 수송 과정으로 나타난다. 이러한 특성은 기체 확산을 전제로 설계된 기존 화학작용제 대응 모델을 그대로 적용하기 어렵게 만든다.

NATO 및 미 국방부 관련 평가에서도 입자형 생물학작용제가 방호 체계 및 여과 시스템을 통과하는 거동이 화학작용제와 상이할 수 있으며, 내부 표면과의 상호작용을 통해 장시간 잔존할 가능성을 지적하고 있다. 특히 침적된 입자가 인적 활동이나 기계적 진동에 의해 재부유될 경우, 초기 유입 이후에도 2차 노출이 발생할 수 있다는 점은 기존 화학작용제 대응 개념에서 충분히 고려되지 않은 요소이다. 이러한 잔존성과 지연 효과는 생물학 위협을 단시간 사건이 아니라, 시간에 따라 진화하는 내부 오염 문제로 인식해야 함을 보여준다.

과거 함정 기반 시험과 평가 사례에서 도출된 교훈 역시 이러한 차별성을 뒷받침한다. 에어로졸화된 생물학 유사체를 사용한 함정 시험에서는, 작용제가 외부에서 유입된 이후 환기 및 집단 방호 체계가 작동한 상태에서도 내부 구획으로 침투하여 의도된 격리 범위를 넘어 확산될 수 있음이 관찰되었다. 이는 화학작용제 대응을 전제로 설계된 방호 개념이 생물학 에어로졸의 입자 기반 거동과 내부 잔존성을 충분히 제어하지 못할 수 있음을 보여준다.

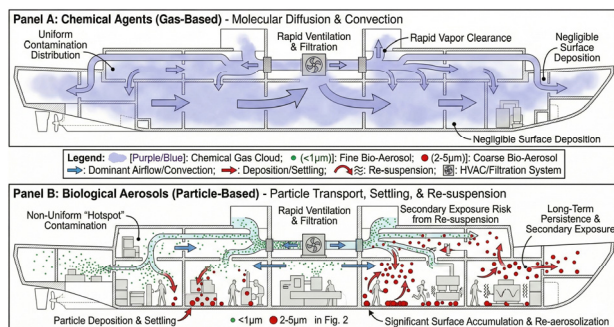


Fig. 3. Dispersion and behavior of chemical agent and biological agent in naval ship

이러한 차이는 Fig. 3와 같이, 화학작용제가 비교적 균질한 기체 확산과 제거 중심의 관리 대상인 반면, 생물학 에어로졸은 환기 유동과 구획 구조, 압력 관계

에 따라 비균질적으로 이동·잔존하는 위협임을 명확히 보여준다. 결국 화학작용제와 생물학 에어로졸은 공중 위협이라는 공통점을 가지지만, 확산 메커니즘과 시간적 특성, 그리고 내부 환경과의 상호작용 측면에서 본질적으로 상이하다. 따라서 생물학 위협에 대한 효과적인 대응을 위해서는 화학 중심의 확산 가정과 제거 위주의 대응 논리에서 벗어나, 입자 기반 거동과 내부 확산 특성을 명시적으로 고려한 별도의 대응 개념이 요구된다.

2.4 환기 및 압력 제어 시스템의 영향

환기 시스템은 함정 내 생물학 오염 상황에서 상반된 역할을 동시에 수행한다. 한편으로는 거주 환경을 유지하고 여과 및 압력 구획화를 통해 집단 방호를 가능하게 하는 필수 요소이지만, 다른 한편으로는 공기 흐름이 부적절하게 설정될 경우 생물학 에어로졸의 구획 간 이동을 촉진하는 경로로 작용할 수 있다. 민간 및 군사 분야의 HVAC(heating, ventilation, and air conditioning) 연구에 따르면, 공기 흐름의 방향성, 유량, 그리고 구획 간 압력 구배는 에어로졸 이동에 결정적인 영향을 미치는 핵심 변수로 작용한다.

HVAC 시스템을 통한 공중 병원체 전파에 관한 기존 연구에서는 환기량을 단순히 증가시키는 것만으로 노출 위험이 항상 감소하지 않으며, 경우에 따라서는 오염 물질의 공간적 분산을 확대할 수 있음을 보고하고 있다. 또한 구획 기반 모델링 접근법은 상호 연결된 공간이 균일한 혼합 공간으로 거동하기보다는, 우선적인 공기 흐름 경로를 따라 오염원이 전파되는 네트워크 구조를 형성함을 보여준다. 이러한 결과는 연기 제어나 화학 증기 통제를 목적으로 최적화된 환기 전략이 함정 내 생물학 에어로졸 상황에서는 그대로 적용되기 어렵다는 점을 의미한다.

앞서 검토한 문헌은 해군 함정에서의 효과적인 생물학 오염 관리가 단순한 오염 제거 중심 접근을 넘어, 내부 확산 억제를 우선 목표로 설정해야 함을 공통적으로 보여준다. 여러 연구에서는 생물학 에어로졸이 함정 내부로 유입된 이후 완전한 노출 차단이 현실적으로 어렵다는 점을 지적하며, 이에 따라 2차 피해를 최소화하기 위한 보완적 완화 조치의 중요성을 강조하고 있다. 최근의 생물방호 평가 역시 탐지, 공기 흐름 관리, 그리고 운용 의사결정을 통합한 다층적

대응 전략의 필요성을 제시하고 있다.

이러한 맥락에서 환기 및 압력 제어는 생물학 오염 초기 대응 단계에서 구획 간 오염 확산을 제한하기 위한 동적 관리 수단으로 재인식될 필요가 있다. 공기 흐름 경로와 압력 관계를 선택적으로 조정함으로써 오염을 제한된 구역에 국한하고 승조원 노출을 저감하며, 상위 수준의 대응 조치를 준비할 시간을 확보할 수 있다. 이러한 개념적 이해는 다음 절에서 논의할 적용 지향적 환기 제어 전략의 이론적 기반을 형성한다.

3. 생물학 오염 통제를 위한 환기 및 압력 제어 기반 적용 전략

3.1 오염 제거에서 확산 억제로의 전환: 환기 기반 생물학 오염 대응 개념

해군 함정에서의 생물학 에어로졸 오염 대응은 오염 제거 중심의 접근에서 내부 확산 억제를 우선시하는 전략으로의 전환을 요구한다. 화학작용제 대응에서 효과적인 강제 환기, 전면 차단, 또는 급속 배출과 같은 제거 중심 방식은 입자 기반 거동과 잔존성을 특징으로 하는 생물학 에어로졸에 대해서는 동일한 효과를 보장하지 않는다. 오히려 환기 유량을 급격히 변화시키는 조치는 에어로졸의 재분배를 촉진하여 오염 범위를 확대시킬 가능성이 있다.

이러한 한계를 고려할 때, 생물학 오염 대응에서 환기 시스템의 역할은 ‘오염 제거 장치’가 아니라 ‘확산 제어 장치’로 재정의될 필요가 있다. 즉, 환기 제어의 핵심 목적은 공기 흐름을 통해 오염을 배출하는 데 있지 않으며, 오염이 이동할 수 있는 경로를 제한하고 구획 간 전파를 차단하는 데 있다. 이를 위해 본 연구는 환기 제어를 공기 흐름의 방향성, 구획 간 압력 관계, 그리고 환기 유량이라는 세 가지 핵심 제어 요소의 조합으로 개념화한다. 이러한 개념적 전환은 Fig. 4와 같이, 기존의 제거 중심 생물학 오염 대응이 오염 물질의 배출에 초점을 두는 반면, 환기 및 압력 제어 기반 접근은 오염의 이동 경로와 구획 간 확산을 관리 대상으로 설정한다는 점에서 근본적인 차이를 보인다.

첫째, 공기 흐름의 방향성(directional airflow)은 생물학 오염 대응에서 가장 우선적으로 고려되어야 할 요소이다. 생물학 에어로졸은 기류를 따라 이동하므로, 환기 시스템은 청정도가 상대적으로 높은 구획

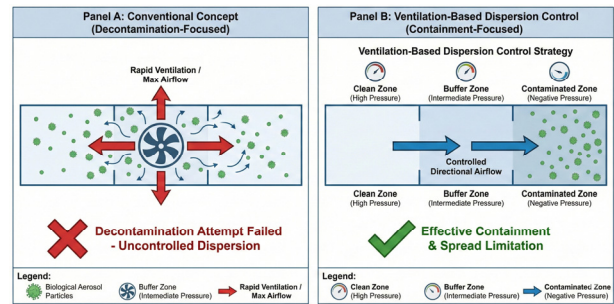


Fig. 4. Comparison of biological aerosol response concept (conventional vs. ventilation-based dispersion concept)

에서 오염 가능성이 높은 구획 방향으로 공기가 흐르도록 설정되어야 한다. 이는 오염 구획으로부터의 역류를 최소화하고, 임무 핵심 공간으로의 비의도적 유입을 방지하는 것을 목표로 한다.

둘째, 구획 간 압력 관계(pressure hierarchy)는 공기 흐름 방향성을 안정적으로 유지하기 위한 구조적 수단이다. 임무 핵심 구획이나 인원 보호가 중요한 공간에는 인접 구획 대비 미세한 양압을 유지하고, 오염 가능성이 높은 구획이나 완충 공간에는 제어된 음압을 적용함으로써 에어로졸의 비의도적 이동을 억제할 수 있다. 이러한 압력 위계는 완전한 밀폐를 전제로 하지 않으며, 장시간 유지 가능한 수준의 미세 압력 차를 기본 원칙으로 한다.

셋째, 환기 유량 조절(ventilation rate control)은 확산 억제 전략을 보조하는 수단으로 활용되어야 한다. 생물학 오염이 의심되는 초기 단계에서는 환기 유량을 급격히 증가시키기보다는 필요 최소 수준으로 유지하면서, 공기 흐름의 방향성과 압력 제어를 우선하는 것이 바람직하다. 이후 오염 구획이 특정되고 상황 인식이 향상됨에 따라 선택적 환기 증가나 국부적 배출을 통해 제한된 범위에서의 제거를 병행할 수 있다.

이와 같은 환기 기반 대응 개념은 환기 시스템을 정상/차단의 이분법적 상태로 운용하는 기존 방식과 명확히 구별된다. 대신 생물학 위협의 불확실성과 지속성을 고려하여, 확산 억제를 중심으로 한 단계적·조합적 제어를 가능하게 한다. 초기 대응 단계에서의 목표는 완전한 오염 제거가 아니라 오염의 공간적 확산을 제한하고, 지휘관에게 상황 판단과 후속 대응을 위한 시간을 제공하는 데 있다. 이러한 개념적 전환은 이후 절에서 논의할 준 기반 구획화, 적응적 환기 운용 모드, 그리고 지휘 의사결정과 연계된 환기 제어

논리의 이론적 기반을 형성한다.

3.2 존 기반 구획화 및 압력 위계 제어

본 연구에서 제안하는 존 기반 구획화는 단순한 공간 분류가 아니라, 생물학 오염 확산을 관리하기 위한 운용적 계층 구조를 설정하는 데 목적이 있다. 존 구분의 기준은 (i) 해당 구획의 작전 중요도, (ii) 인원 밀집도 및 체류 시간, (iii) 외부 및 인접 구획과의 연결성, 그리고 (iv) 오염 발생 가능성의 상대적 수준으로 정의된다. 이러한 기준은 함정의 고정된 구조를 변경하지 않고도, 운용 논리 차원에서 적용 가능하도록 설정되었다.

이에 따라 함정 내부 구획은 개념적으로 세 가지 주요 존으로 구분된다. 제1존(임무 핵심 존)은 지휘·통제실, 통신실, 전투정보 처리 구역과 같이 함정의 작전 수행에 필수적인 공간으로 구성된다. 제2존(인원 보호 존)은 취침 구역, 의무실, 식당 등 인원 체류 시간이 길거나 인명 보호가 우선되는 공간을 포함한다. 제3존(완충 및 보조 존)은 기관실 인접 구역, 통로, 저장 공간 등 상대적으로 작전 중요도가 낮거나 오염 유입 가능성이 높은 공간으로 정의된다.

이러한 존 구분은 압력 위계 설정의 기초가 된다. Fig. 5와 같이, 제1존은 인접 구획 대비 미세한 양압을 유지하여 외부로부터의 에어로졸 유입을 최소화하며, 제2존은 제1존과 제3존 사이의 완충 역할을 수행하도록 중립 또는 약한 양압 상태로 운용된다. 반면 제3존에는 제어된 음압을 적용하여 오염이 상위 존으로 확산되는 것을 억제한다. 이때 적용되는 압력 차는 완전한 밀폐를 목표로 하지 않으며, 장시간 유지 가능한 범위 내에서 안정적인 공기 흐름 방향성을 확보하는 것을 기본 원칙으로 한다. 운용 참고 수준에서 볼 때, 기존 병원 음압 병실이나 산업용 클린룸에서 적용되는 미세 압력 차는 일반적으로 수 파스칼(Pa) 수준으로 보고되고 있으며, 다수의 지침에서는 약 2–5 Pa(약 0.01–0.02 inH₂O) 이상의 압력 차이가 공기 흐름 방향성 확보의 최소 기준으로 제시되고 있다 [20,21].

다만 해군 함정은 육상 시설에 비해 기밀 유지가 제한적이고 환기 네트워크가 복잡하므로, 본 연구에서는 이러한 수치를 절대적 기준이 아닌 ‘운용 참고 범위’로 제시하며, 실제 적용 가능한 압력 차는 함정별

구조와 환기 체계 특성을 반영한 추가 분석이 필요함을 전제로 한다.

중요한 점은 이러한 압력 위계가 고정된 상태가 아니라, 오염 상황과 작전 요구에 따라 조정 가능해야 한다는 것이다. 예를 들어 특정 제2존에서 생물학 오염이 의심될 경우, 해당 구획은 임시적으로 제3존으로 재분류되어 압력 설정이 변경될 수 있다. 이러한 존의 동적 재지정(dynamic rezoning) 개념은 함정의 물리적 구조 변경 없이도 환기 제어 논리를 통해 오염 확산을 보다 유연하게 관리할 수 있도록 한다.

이와 같은 존 기반 구획화 및 압력 위계 제어는 고위험 생물안전 시설에서 적용되는 압력 구획화 원리를 함정의 운용 현실에 맞게 재해석한 것이다. 특히 다층 구조와 제한된 환기 자원을 가진 함정 환경에서, 제한된 제어 수단을 가장 보호가 필요한 구획에 집중적으로 적용할 수 있다는 점에서 실질적인 운용 이점을 제공한다.

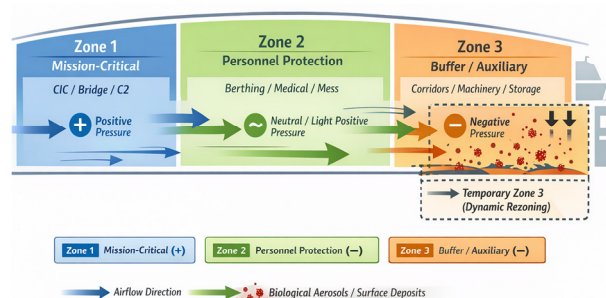


Fig. 5. Zone-based compartmentalization and pressure hierarchy control

3.3 생물학 위협 상황에서의 적응적 환기 제어

앞서 제시한 존 기반 구획화 및 압력 위계 제어는 생물학 오염 확산을 공간적으로 제한하기 위한 구조적 틀을 제공한다. 적응적 환기 제어는 이러한 공간적 구조를 전제로 하여, 위협의 불확실성, 시간적 지속성, 그리고 작전 요구의 변화에 따라 환기 운용을 단계적으로 조정하는 운용 논리를 의미한다. 즉, 본 절에서 논의하는 적응적 환기 제어는 존 구획화를 대체하는 개념이 아니라, 이를 시간 축에서 활성화하고 조정하는 보완적 운용 수단이다.

생물학 위협 상황에서는 화학 위협과 달리 즉각적이고 명확한 탐지 신호가 제공되지 않는 경우가 많다. 이에 따라 환기 제어는 단일 시점의 전면 차단 또

Table 1. Zone-based adaptive ventilation Strategy for phased biological threats

Biological Threat Level	Zone Configuration Status	Ventilation Flow Control	Airflow Directionality	Pressure Control Strategy	Primary Operational Objective
Normal	Default configuration of Zone 1 / Zone 2 / Zone 3	Normal ventilation	Maintain design airflow rate	Standard pressure hierarchy	Maintain habitability and conduct normal operations
Suspected	Zone structure maintained	Gradual overall airflow reduction	Strict maintenance of airflow direction (Zone 1 → Zone 2 → Zone 3)	Maintain positive pressure in Zone 1; controlled negative pressure in Zone 3	Suppress aerosol redistribution while maintaining habitability
Probable	Dynamic reassignment of suspected contaminated compartments (Zone 2 → temporary Zone 3)	Selective airflow reduction centered on affected compartments	Reconfigure airflow to avoid mission-critical spaces	Strengthen pressure gradient centered on protecting Zone 1	Prevent inter-compartmental spread and protect mission-critical spaces
Confirmed / Sustained	Maintain buffer zones surrounding contaminated areas	Local ventilation control and selective filtration	Localized exhaust centered on buffer zones	Sustain long-term stable pressure Hierarchy	Maintain operational continuity and reduce cumulative exposure

는 일괄 운용이 아니라, 위협 인식 수준에 따라 점진적으로 변화하는 단계적 운용을 필요로 한다. 본 연구에서는 이러한 운용 단계를 개념적으로 초기 불확실 단계, 위협 증대 단계, 그리고 지속·확인 단계로 구분한다.

(i) 초기 불확실 단계에서는 생물학 오염이 의심되지만 확정되지 않은 상태로, 환기 제어의 주요 목적은 에어로졸의 불필요한 재분배를 최소화하는 데 있다. 이 단계에서는 전체 환기량을 급격히 증가시키거나 차단하기보다는, 앞 절에서 정의한 존 간 압력 위계와 공기 흐름 방향성을 유지한 상태에서 환기 유량을 완만하게 감소시키는 것이 바람직하다. 이를 통해 Zone 1(임무 핵심 존)에서 Zone 2 및 Zone 3 방향으로의 일방향 공기 흐름을 유지하면서도, 에어로졸의 광범위한 확산을 억제할 수 있다.

(ii) 위협 증대 단계에서는 특정 구획 또는 존에서 오염 가능성이 높아졌다고 판단되는 상황을 가정한다. 이 경우 환기 제어는 보호 우선순위에 따라 보다 선택적으로 적용된다. Zone 1은 기존의 양압을 유지하거나 강화하여 보호를 최우선으로 하고, 오염 의심 구획이 포함된 Zone 2는 임시적으로 Zone 3으로 재분류되어 압력 설정과 환기 경로가 조정될 수 있다. 이러한 동적 존 재지정(dynamic rezoning)은 환기 유동을 재구성함으로써, 오염이 상위 존으로 전파되는 것을 억제하는 데 목적을 둔다.

(iii) 지속 또는 확인 단계에서는 생물학 오염이 장시간 지속되거나 일정 수준 이상 확정된 상황을 상정한다. 이 단계에서의 환기 제어는 완전한 차단보다는

확산 억제와 작전 지속성 간의 균형 유지에 초점을 둔다. 환기 시스템은 Zone 3 및 임시 완충 구역을 중심으로 선택적 여과 또는 국부적 배출을 적용할 수 있으며, Zone 1과 Zone 2의 기능 유지와 거주성 확보를 위해 최소한의 공기 교환을 유지한다. 이러한 운용은 장시간 차단으로 인한 승조원 피로와 작전 수행 저하를 방지하는 데 기여한다.

이와 같이 적응적 환기 제어는 환기 시스템을 정상/차단의 이분법적 상태로 운용하는 기존 방식과 근본적으로 구별된다. 대신 존 기반 구획화와 압력 위계를 전제로 하여, 위협 단계에 따라 환기 유량, 공기 흐름 방향, 그리고 적용 범위를 조합적으로 조정함으로써 보다 정교한 위협 관리가 가능해진다. 이러한 단계별 적응적 환기 운용 개념은 Table 1과 같이, 생물학 위협 단계에 따른 존 구성, 환기 유량 조절, 공기 흐름 방향성, 압력 제어 전략을 통합적으로 정리할 수 있다.

3.4 탐지 체계 및 지휘 의사결정 과정과의 통합

환기 기반 완화 전략이 실질적인 작전 효과를 발휘하기 위해서는, 함정 탑재 탐지 체계와 지휘 의사결정 과정 간의 구조적 연계가 필수적이다. 생물학 위협은 화학 위협과 달리 즉각적이고 단일한 탐지 신호로 식별되기 어려우며, 환경적 징후, 정보·첩보, 그리고 의무 관측 결과가 종합적으로 고려되어야 한다. 따라서 생물학 위협 지표는 단순한 경보 발령 수단이 아니라, 환기 제어 수준을 조정하기 위한 의사결정 입력 변수로 활용될 필요가 있다.

이를 위해 본 연구에서는 생물학 위협 지표를 세 가지 범주로 개념화한다. 첫째, 환경 기반 지표로서 제한적 환경 모니터링 결과나 비정상적인 공기질 변화가 포함된다. 둘째, 운용·정보 기반 지표로서 외부 정보, 첩보, 또는 주변 작전 환경의 변화가 고려된다. 셋째, 의무·인체 기반 지표로서 비특이적 증상 관측이나 집단적 건강 이상 징후가 포함될 수 있다. 이러한 지표들은 개별적으로 해석되기보다는, 시간적 추세와 상호 일관성을 기준으로 종합 평가되는 것으로 한다.

이와 같은 위협 지표 평가는 앞서 4.3절에서 제시한 위협 단계 구분과 연계되어, 환기 제어 수준을 단계적으로 조정하는 판단 근거로 활용된다. 예를 들어 단일 지표에 기반한 불확실한 상황에서는 초기 단계 환기 운용이 유지되며, 복수의 지표가 일정 기간 일관되게 관측될 경우 위험 증대 단계로 전환되어 존재지정이나 압력 설정 변경이 검토될 수 있다. 이 과정에서 지휘관은 고정된 절차에 따라 자동으로 환기 모드를 전환하기보다는, 사전에 정의된 선택지(option set) 중에서 작전 우선순위와 승조원 보호 수준을 고려하여 적절한 환기 운용 모드를 선택하게 된다.

이러한 의사결정을 지원하기 위해, 구획별 공기 흐름 방향, 압력 상태, 그리고 존 구성이 시각적으로 표현된 의사결정 지원 도구의 활용이 고려될 수 있다. 이러한 도구는 환기 시스템의 현재 상태와 잠재적 확산 경로를 직관적으로 제시함으로써, 지휘관이 불확실한 생물학 위협 상황에서도 보다 합리적인 판단을 내릴 수 있도록 지원한다. 이와 같은 통합 구조를 통해 환기 시스템은 단순한 기반 시설을 넘어, 함정의 생물학 방호 태세를 구성하는 능동적 운용 수단으로 기능하게 된다.

3.5 기존 함정 환기 체계에서의 현실적 적용 방안: 팬데믹 대응 경험을 기반으로 한 기술적 근거

대부분의 현용 해군 함정은 생물학 에어로졸 확산 억제제를 전제로 설계되지 않았으며, 구획별 독립 환기 계통이나 정밀한 압력 제어를 구조적으로 구현하기 어렵다. 따라서 본 논문에서 제안하는 대응 전략은 새로운 하드웨어의 도입이 아니라, 기존 환기 체계를 전제로 한 운용 방식의 재구성을 핵심으로 한다. 이러한 접근은 코로나19 팬데믹 기간 동안 병원, 항공기, 대

형 선박 등 구조 변경이 제한된 환경에서 적용된 실내 에어로졸 관리 원칙과 궤를 같이한다.

기존 함정 환경에서 적용 가능한 첫 번째 현실적 조치는 환기 운용의 기준을 ‘차단 여부’가 아니라 ‘공기 흐름 방향의 유지 여부’로 설정하는 것이다. 생물학 오염이 의심되는 상황에서 전면 환기 차단은 공기질 저하와 승조원 피로를 빠르게 유발할 수 있으며, 팬데믹 기간 중 다수의 실내 환경 지침에서도 장시간 차단은 권장되지 않았다. 이에 따라 지휘관의 판단은 ‘환기를 중단할 것인가’가 아니라, ‘어디에서 어디로 공기가 흐르도록 유지할 것인가’에 우선적으로 집중될 필요가 있다. 실무적으로 이는 기존 댐퍼 설정과 팬 운용 조건을 유지한 상태에서, 역류 가능성이 있는 덕트만을 제한적으로 조정하는 방식으로 구현 가능하다.

두 번째 적용 방안은 물리적 구조 변경이 아닌, 운용 논리에 기반한 존 설정이다. 기존 함정에서 벽체나 환기 덕트를 추가로 설치하지 않더라도, 지휘관은 환기 운용 지침을 통해 특정 구획을 임시적으로 ‘보호 존’ 또는 ‘완충 존’으로 지정할 수 있다. 예를 들어 지휘통제실이나 의무실은 환기 흐름의 상류(upstream)에 위치하도록 유지하고, 복도나 보조 구획은 하류(downstream)로 기능하도록 설정할 수 있다. 이는 팬데믹 대응 과정에서 음압 병실이 제한된 상황에서, 복도와 인접 공간을 완충 구역으로 활용한 병원 운용 방식과 유사한 접근이다.

세 번째로 환기 유량 조정은 전면적 조치가 아닌, 선택적·국부적으로 적용되어야 한다. 생물학 오염이 의심되는 초기 단계에서는 전체 환기량을 증가시키거나 차단하기보다, 오염 가능성이 제기된 구획의 환기 유량만을 제한하는 것이 바람직하다. 이러한 국부적 제어는 에어로졸의 광범위한 재분배를 방지하는 동시에, 임무 핵심 구획의 공기질을 유지하는 데 기여한다. 코로나19 기간 중 제시된 다수의 HVAC 지침 역시 국부 환기 조정(localized control)이 전면 조정보다 효과적일 수 있음을 반복적으로 강조한 바 있다.

네 번째로 환기 운용은 단일 결정이 아니라, 주기적 재평가의 대상으로 인식되어야 한다. 생물학 위협은 시간에 따라 진화하며, 초기 판단이 장시간 유지될 필요는 없다. 이에 따라 지휘관은 일정 시간 간격으로 환경 정보, 승조원 건강 상태, 외부 작전 상황을 종합하여 환기 운용 모드를 재평가하고, 필요 시 존 지정과 환기 설정을 완화 또는 강화할 수 있어야 한다. 이는

팬데믹 대응 과정에서 방역 수준이 단계적으로 강화·완화되었던 위험 관리 논리와 동일한 구조를 가진다.

이와 같은 운용 방식은 새로운 센서나 자동화 체계의 도입 없이도 적용 가능하다. 필요한 것은 환기 체계를 생물학 위협 대응 수단으로 인식하는 지휘관의 운용 프레임 전환과, 기관·CIC·의무 요소 간에 사전 합의된 대응 절차이다. 즉, 본 논문에서 제안하는 현실적 적용 방안의 핵심은 구조 변경이 아니라, 기존 환기 체계를 ‘확산 억제 도구’로 활용하는 운용 개념의 명문화에 있다.

Fig. 6와 같이, 이러한 접근은 기존 함정 환기 체계의 물리적 제약을 전제로 하면서도, 공기 흐름의 방향성, 존 설정, 환기 유량 조절을 조합적으로 운용함으로써 생물학 에어로졸 확산을 효과적으로 억제하는 전략으로 정리될 수 있다.

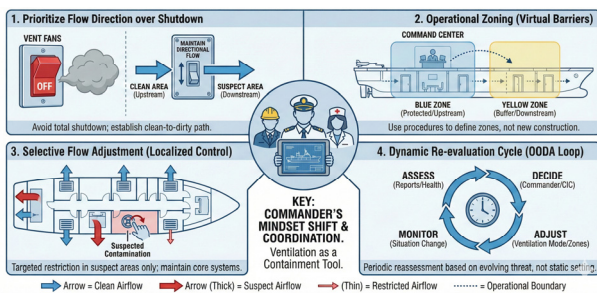


Fig. 6. Practical application in existing naval ship; operational ventilation strategy for biological aerosol

종합하면, 기존 함정 환경에서 생물학 방호를 강화하기 위한 가장 현실적인 접근은 ‘완벽한 차단’이 아니라, 공기 흐름을 통제하고 보호 우선순위를 설정하며, 지휘관에게 대응 시간을 확보하는 환기 운용이다. 코로나19 팬데믹을 통해 축적된 실내 에어로졸 관리 경험은 이러한 접근이 구조적 제약 하에서도 실질적인 위험 저감 효과를 가질 수 있음을 보여준다. 본 논문에서 제시한 전략은 지휘관이 즉각적으로 적용 가능한 운용 선택지를 제공한다는 점에서, 기존 함정 CBRN 체계를 실질적으로 보완하는 방안으로 평가될 수 있다.

3. 결론

해군 함정은 밀폐되고 기계식 환기에 의존하는 환경적 특성으로 인해, 공중으로 유입된 생물학 오염원이 구획 간을 빠르게 이동·확산할 수 있는 구조적 취약

약성을 내재하고 있다. 그럼에도 불구하고 기존 함정 CBRN 방호 개념은 주로 화학작용제를 기체 기반 위협으로 가정된 제거 중심 대응 패러다임에 기반해 발전해 왔으며, 이로 인해 입자 기반 거동과 잔존성을 특징으로 하는 생물학 에어로졸 위협에 대해서는 충분한 설명과 대응 논리를 제공하지 못해 왔다.

본 연구는 함정 내부 환경에서의 생물학 에어로졸 물리적 거동 특성을 분석하고, 이를 바탕으로 함정 생물학 방호 개념을 ‘오염 제거’에서 ‘내부 확산 억제’ 중심으로 재정의하는 적용 지향적 프레임워크를 제시하였다. 특히 생물학 에어로졸이 환기 유동을 따라 이동하며 침적과 재부유를 반복하는 특성을 고려할 때, 기존의 환기 차단 또는 강제 배출 중심 대응은 오히려 오염 확산을 악화시킬 수 있음을 논증하였다.

이러한 문제 인식을 토대로 본 논문은 존 기반 구획화와 압력 위계 제어, 그리고 위협 단계에 따라 환기 운용을 조정하는 적응적 환기 제어 개념을 핵심 전략으로 제안하였다. 제안된 접근은 함정의 물리적 구조 변경이나 신규 장비 도입을 전제로 하지 않으며, 기존 환기 인프라와 운용 체계를 활용하여 임무 핵심 공간 보호, 구획 간 오염 확산 억제, 그리고 작전 지속성 유지를 동시에 달성하는 것을 목표로 한다. 또한 탐지 체계 및 지휘 의사결정 과정과의 연계를 통해, 환기 시스템을 수동적 기반 시설이 아닌 능동적 방호 수단으로 활용하는 운용 논리를 제시하였다.

본 연구의 중요한 기여는 이상적인 설계 조건이 아니라, 현용 함정이 가진 구조적 제약을 전제로 한 최선의 적용 방안을 제시하였다는 점에 있다. 코로나19 팬데믹 기간 동안 축적된 실내 공기질 관리 및 에어로졸 확산 억제 경험은, 구조 변경이 제한된 환경에서도 환기 운용 논리의 조정만으로 의미 있는 위험 저감이 가능함을 보여주었다. 이러한 경험을 함정 환경에 적용함으로써, 본 논문은 생물학 위협을 단기적 사건이 아닌 장기적으로 관리해야 할 내부 오염 위협으로 인식하는 실질적인 대응 방향을 제시하였다.

제안된 프레임워크는 생물학 오염 발생 이후 노출을 완전히 차단하는 것을 목표로 하지 않는다. 대신 오염의 공간적 확산을 제한하고, 지휘관에게 상황 판단과 후속 대응을 위한 시간을 확보함으로써 불확실한 생물학 위협 상황에서도 승조원 안전과 작전 수행 능력 간의 균형을 유지하는 데 목적이 있다. 이러한 접근은 해군 함정 CBRN 방호 개념을 보다 유연하고

회복력 있는 체계로 발전시키는 데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

향후 연구에서는 제안된 개념을 기반으로 함정별 환기 구조를 반영한 정량적 공기 유동 분석, 운용 시나리오별 효과 평가, 그리고 차세대 생물학 에어로졸 탐지 기술과의 연계 방안을 검토할 수 있을 것이다. 그럼에도 불구하고 본 논문에서 제시한 개념과 적용 전략은 현행 체계 내에서 즉각적으로 활용 가능한 생물학 방호 강화의 출발점으로서 분명한 의미를 가진다.

참고문헌

- [1] Andre Richardt & Bernd Niemeyer, 'Collective Protection – A Secure Area in a Toxic Environment,' in *CBRN Protection: Managing the Threat of Chemical, Biological, Radioactive and Nuclear Weapons*, Wiley-VCH, 2013, pp. 331–349.
- [2] Christos D. Argyropoulos, Vasiliki Skoulou, Georgios Efthimiou, & Apostolos K. Michopoulos, 'Airborne Transmission of Biological Agents Within the Indoor Built Environment: A Multidisciplinary Review,' *Air Quality, Atmosphere & Health*, VOL. 16, 2023, 477–533.
- [3] William W. Nazaroff, 'Indoor Bioaerosol Dynamics,' *Indoor Air*, VOL. 26, NO. 1, 2016, pp. 61–78.
- [4] Helmut Brandl, Astrid von Däniken, Carmen Hitz, & Walter Krebs, 'Short-Term Dynamic Patterns of Bioaerosol Generation and Displacement in an Indoor Environment,' *Aerobiologia*, VOL. 24, 2008, pp. 203–209.
- [5] National Research Council, *Post-Exposure Medical Countermeasures for Naval Forces*, National Academies Press, 2004.
- [6] Joint Chiefs of Staff, JP 3-41: Chemical, Biological, Radiological, and Nuclear Response, Department of Defense, 2025.
- [7] Alpay Acar, Murat Uryan, Ali Doğrul, Asım Sinan Karakurt, & Cenk Çelik, 'Numerical Investigation of HVAC Systems of a Naval Ship Compartment: Natural Ventilation and Air-Conditioning,' *Journal of Naval Sciences and Engineering*, VOL. 19, NO. 1, 2023, pp. 77–100.
- [8] Prashant Kumar, Sarkawt Hama, Ho Yin Wickson Cheung, Christos Hadjichristodoulou, Varvara A. Mouchtouri, LEMONIA Anagnostopoulos, Leonidas Kourentis, Zhaozhi Wang, Edwin R. Galea, John Ewer, et al., 'Airborne Pathogen Monitoring and Dispersion Modelling on Passenger Ships: A Review,' *Science of the Total Environment*, VOL. 980, 2025, article 179571.
- [9] Fangzhi Chen, Simon C. M. Yu, & Alvin C. K. Lai, 'Modeling Particle Distribution and Deposition in Indoor Environments with a New Drift-Flux Model,' *Atmospheric Environment*, VOL. 40, NO. 2, 2006, pp. 357–367.
- [10] Maria A. Zawadowicz, Karl D. Froyd, Anne E. Perring, Daniel M. Murphy, Dominick V. Spracklen, Colette L. Heald, Peter R. Buseck, & Daniel J. Cziczo, 'Model-Measurement Consistency and Limits of Bioaerosol Abundance over the Continental United States,' *Atmospheric Chemistry and Physics*, VOL. 19, NO. 22, 2019, pp. 13859–13870.
- [11] Parichehr Salimifard, Donghyun Rim, Carlos Gomes, Paul Kremer, & James D. Freihaut, 'Resuspension of Biological Particles from Indoor Surfaces: Effects of Humidity and Air Swirl,' *Science of the Total Environment*, VOL. 583, 2017, pp. 241–247.
- [12] Devabhaktuni Srikrishna, 'Pentagon Found Daily, Metagenomic Detection of Novel Bioaerosol Threats to Be Cost-Prohibitive: Can Virtualization and AI Make It Cost-Effective?,' *Health Security*, VOL. 22, NO. 2, 2024, pp. 108–129.
- [13] Seo-an Lee, Jeong-hyeon Lee, Jong-Hun Im, & Sang-deuk Lee, 'Improvement of Indoor Air Quality Aboard Operational Ships According to Changes in Atmospheric Environment,' *Journal of Advanced Marine Engineering and Technology*, VOL. 48, NO. 6, 2024, pp. 532–539.
- [14] Maritime Safety Committee (MSC), MSC.1/Circ.1034: Guidelines for the Design, Installation and Testing of Ventilation Systems, 2022.
- [15] NAVSEA, *Chemical, Biological, and Radiological Defense: The Evolution of Collective Protection Systems*, 2023.
- [16] Bureau Veritas (BV), *Rules for the Classification of Naval Ships: Ventilation and Air Conditioning Systems*, 2024.
- [17] Department of the Navy, *Naval Ships' Technical Manual (NSTM) Chapter 470: Shipboard BW/CW Defense and Countermeasures*. Washington, DC: Naval Sea Systems Command, 2012.
- [18] NATO, AEP-54: NATO Guidelines for Collective Protection on Board Ships, Brussels: NATO Standardization Agency, 2014.
- [19] Department of the Army, Marine Corps, Navy, and Air Force, *CBRN Defense (Joint Publication 3-11)*, 2017.
- [20] Centers for Disease Control and Prevention (CDC), *Guidelines for Environmental Infection Control in Health-Care Facilities*, Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services, 2003 (updated 2019).
- [21] World Health Organization (WHO), *Natural Ventilation for Infection Control in Health-Care Settings*, Geneva, Switzerland: WHO Press, 2009.