

CBRN 상황에서의 Ad-hoc 통신 기반 방호체계 설계: 방독면 중심의 대응전략 연구

황현호*, 임대환**

Design of an Ad-hoc Communication-based Protection System in CBRN Scenarios: A Gas Mask-Centered Response Strategy

Hwang HyunHo*, Lim DaiHwan**

요약

화학, 생물학, 방사능, 핵(CBRN) 위협은 최근 도시 밀집 지역을 중심으로 무인기와 같은 비대칭 수단을 활용한 공격 방식으로 진화하고 있다. 본 연구는 기존의 중앙집중형 방호체계가 가진 반응속도 및 구조적 한계를 극복하기 위해, Ad-hoc 네트워크 기반의 분산형 방독면 대응체계를 제안한다. 방독면에 부착된 센서와 저전력 블루투스(BLE) 통신을 통해 위험 정보를 실시간 공유하고, 사용자에게 음성 및 진동으로 알람을 제공하는 구조이다. 본 연구는 시뮬레이션을 통해 기존 대비 반응속도 개선 및 CBRN 확산 방지 효과를 검증하였다.

Abstract

Recent Chemical, Biological, Radiological, and Nuclear (CBRN) threats are evolving into asymmetric attacks utilizing drones in densely populated urban areas. This study proposes a distributed gas mask-centered response system based on an Ad-hoc communication network to overcome the limitations of centralized protection structures. By integrating sensors and low-power Bluetooth (BLE) modules into gas masks, the system enables real-time information sharing and alerts users via audio and vibration signals. Simulation results confirm enhanced response speed and improved containment compared to conventional systems.

Keywords

CBRN, gas mask, ad-hoc network, BLE, protective system

1. 서론

21세기 들어 국제 안보 환경은 전통적인 군사 충돌에서 벗어나 비대칭 위협의 증가로 변화하고 있다. 특히 CBRN(Chemical, Biological, Radiological, Nuclear) 위협은 저비용 고효율의 파괴력을 바탕으로

로, 테러리스트나 비국가행위자에 의해 활용 가능성이 높아지고 있다. 최근에는 도심지, 공공장소, 교통 시설 등 인구 밀집 지역을 표적으로 한 화학 또는 생물학적 공격이 우려되고 있으며, 실제로 시리아 내전, 북한의 실험 사례 등은 이러한 우려를 현실화시키고 있다[1]. 더불어 무인기(UAV, Unmanned

* 한양사이버대학교 국방융합기술학과 조교수
- ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4065-0943>

** 호서대학교 스마트팜AI데이터센터 교수(교신저자)
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0749-7983>

· Received: Jul. 31, 2025, Revised: Sep. 11, 2025, Accepted: Sep. 14, 2025

· Corresponding Author: Lim DaiHwan

SFAD lab, Hoseo-ro 64, Baebang-eup, Asan-si, Chungcheongnamdo, Korea

Tel.: +82-41-540-5986, Email: jpeace1226@gmail.com

Aerial Vehicle)를 이용한 생화학 물질 살포, 자동화된 공격 시스템의 확산 등은 기존 방호체계의 유효성을 위협하고 있다[2].

기존 CBRN 방호체계는 일반적으로 정적 감시체계, 중앙 집중식 분석 프로세스, 유선 기반 통신 인프라 등을 기반으로 한다. 이러한 구조는 고정형 인프라에 대한 의존도가 높아, 네트워크가 마비되거나 주요 노드가 파괴될 경우 전체 방호 기능이 마비되는 취약점을 지닌다. 특히 도심지나 민간인이 혼재한 환경에서는 긴급한 의사결정이 요구되나, 서버-서버 간 지연, 데이터 수집-분석 간 시간 차이로 인해 효과적인 초기 대응이 어렵다[1]. 또한 기존 시스템은 사용자 개별 보호 수준보다는 광역 대응에 초점을 맞추고 있어, 개인 단위에서의 조기 탐지와 자율적 대처 기능이 부족하다.

본 연구는 CBRN 상황에서 실시간 분산 대응이 가능한 새로운 방호체계를 제시하고자 한다. 구체적으로는 방독면 플랫폼에 고감도 센서와 BLE (Bluetooth Low Energy) 기반 통신 모듈을 탑재하고, 이를 다중 노드로 구성된 Ad-hoc 네트워크와 연동함으로써 탐지-경보-분석-전파 기능을 단일 장비에 통합하는 분산형 방호체계를 설계한다. 이를 통해 사용자는 개별적으로 위협 상황을 감지하고, 주변 사용자 및 지휘체계와 정보를 실시간 공유할 수 있다. 본 논문은 이러한 체계의 설계 원리, 구성 요소, 적용 시나리오 및 성능 분석을 통해 제안 체계의 유효성을 검증하는 것을 목표로 한다.

II. 이론적 배경 및 관련 기술

CBRN 대응 체계는 일반적으로 탐지(Detection), 식별(Identification), 대응(Response), 복구(Recovery)의 네 단계로 구성된다. 각 단계는 상황 인식(SA, Situational Awareness), 명령 통제(Command and Control), 보호장비(PPE, Personal Protective Equipment), 탐지센서, 통신 네트워크 등의 상호작용을 통해 작동한다. NATO와 미국 국토안보부(DHS, Department of Homeland Security)는 이러한 구조를 기반으로 표준 운영 절차(SOP, Standard Operating Procedure)를 마련하고 있으며, 다중 에이전시 간의 협업 체계를 강조하고 있다[3][4]. 특히 실시간 정보

공유와 분산 분석은 화학 및 생물학 공격과 같이 빠르게 확산되는 위협에 대한 효과적인 대응을 위한 핵심 요소로 간주된다.

현대 방독면은 단순한 여과 기능을 넘어 다양한 ICT 요소의 통합이 가능하다. NIOSH 기준을 만족하는 고성능 필터뿐 아니라, 온도, 습도, CO₂, VOC(휘발성 유기화합물), 유독가스 등의 실시간 감지 센서를 통합할 수 있다. 또한, BLE, ZigBee 등 저전력 무선 통신 모듈의 소형화 및 저가화로 인해 방독면과의 통합이 현실화되고 있다. 일부 상용 스마트 마스크는 이미 공기질 감지와 무선 통신 기능을 탑재한 사례가 존재한다[5].

Ad-hoc 네트워크는 중앙 인프라 없이 노드 간 자율적으로 구성되는 통신망으로, 이동성, 자가치유(Self-healing), 확장성 등에서 강점을 지닌다. 군사 분야에서는 MANET(Mobile Ad-hoc Network)을 기반으로 하는 전술데이터링크(TDL, Tactical Data Link임), 무전 기반 네트워크, 전장 감시 체계에 활발히 적용되고 있다. 미군은 무선 센서 노드 및 병사 착용 장비 간의 정보 공유를 통해 상황 인식을 높이는 시스템을 운용 중이며, 한국군 또한 전술정보통신체계(TICN, Tactical Information Communication Network)를 기반으로 유사 구조를 발전시키고 있다[6][7]. 특히 UAV 및 로봇 플랫폼과의 융합을 통해 노드 확장성과 범위 확대가 용이하다는 장점이 있다.

III. Ad-hoc 기반 방독면 중심 방호체계 설계

3.1 네트워크 구성

제안하는 방호체계는 방독면에 부착된 센서 노드, 정보를 중계하는 이동형 중계 노드, 그리고 상황 분석 및 의사결정을 수행하는 분석 노드로 구성된다. 이들 노드는 BLE 또는 Wi-Fi Direct와 같은 저전력 무선 통신 기술을 기반으로 메쉬(Mesh) 형태의 Ad-hoc 네트워크를 형성한다. 센서 노드는 위협 물질을 탐지하면 인근 노드로 경보를 전달하고, 분석 노드는 수신된 다수의 센서 데이터를 기반으로 위협 여부를 판단한다. 네트워크는 구성원의 수나 위치에 따라 자율적으로 재구성되며, 일부 노드

가 손상되더라도 경로를 재설정하여 정보 전달이 지속되는 자가치유 기능을 보유한다[8].

3.2 실시간 감지기, BLE, 마스크 플랫폼

방독면 전면부 또는 측면에는 화학/생물학 센서 모듈이 내장되며, 센서는 휘발성 유기화합물, 유독 가스, 온도 및 습도 등을 실시간으로 모니터링한다. 센서에서 탐지된 수치는 내장된 BLE 모듈을 통해 주변 노드 및 스마트폰 등으로 전송된다. BLE는 저전력 특성과 고속 페어링이 가능해, 방독면 사용자의 이동성과 통신 효율성을 확보하는 데 유리하다 [9]. 모듈 전체는 소형 배터리로 약 6-8시간 연속 작동이 가능하도록 설계된다. 전력 소모를 줄이기 위하여 내부적으로는 저전력 스케줄링과 슬립모드 전략 보완 기술이, 외부적으로는 외장 배터리팩, 태양광 보조 충전, 다중 전원포트가 적용한다. 위험 상황이 감지되면, 사용자는 다음과 같은 다중 경고 인터페이스를 통해 즉시 알림을 받는다. 1) 마스크 내장 스피커를 통한 음성 경고, 2) 마스크 필터 주변 진동 모터를 통한 촉각 신호, 3) 스마트폰 앱 연동을 통한 실시간 지도 기반 상황 표시. 이러한 다중 경로 알림 방식은 환경 소음, 시각 제약 등 다양한 조건 하에서도 효과적인 경고 전달을 가능하게 한다. 또한, 위리어 플랫폼 적용에 따른 밀폐형 전투 헬멧을 적용시 일률적 통제로 일시적 강제 방독 기능을 활성화가 가능하다.

그림 1은 제안한 저전력 통신기술기반의 Mesh Ad-hoc 네트워크를 도식화한 것이다.

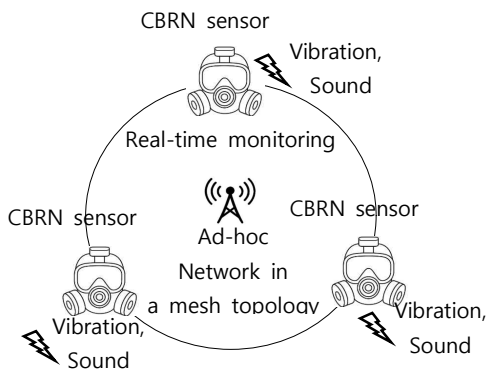


그림 1. 저전력 통신기술 기반의 Mesh Ad-hoc 네트워크
Fig. 1. Low-power wireless Mesh Ad-hoc network

IV. 적용 시나리오 및 시뮬레이션

4.1 도시형 테러/무인기 공격 가정

시뮬레이션 시나리오는 인구 밀집 지역(예: 지하철역, 도심 광장)에서 무인기를 통한 화학물질 살포가 발생한 상황을 가정한다. 공격 직후, 인근 시민들은 스마트 방독면을 착용한 상태이며, 각 방독면은 독립적으로 센서 노드를 형성하고 있다. 공격자는 UAV에서 기화된 유독물질(예: 염소가스, 암모니아)을 살포하고, 기류에 따라 주변 지역으로 확산된다. 최초 탐지 노드는 위험 농도를 감지하고 BLE 통신을 통해 인근 노드에 정보를 전파한다. 복수 노드에서 동일한 오염 수치가 감지될 경우, 중계 노드는 이를 집계하여 분석 노드로 전달하고, 분석 노드는 일정 기준 이상일 경우 전체 경보 상태로 전환한다. 이 구조는 중앙 서버 없이도 분산형 판단 및 경고가 가능함을 시사한다. 경고는 사용자에게 음성 및 진동을 통해 실시간 전달된다.

4.2 기존 체계 대비 반응속도/확산방지 효과

아래 그림 2는 기존 체계(대대급)에서 이루어지는 화상방 상황시 인지 및 조치 과정으로, KM8K2(화학작용제자동경보기)에 의해 상황이 인지되며 해당 장비의 위치에 따라 상황 인지력이 좌우된다. 그리고 아래 표 1은 제안된 Ad-hoc 기반 체계와 기존 중앙집중형 체계의 성능을 비교한 시뮬레이션 결과이다. 주요 항목은 탐지 시간, 경보 전파 시간, 확산 방지율로 구성된다. 분석은 NS-3 기반 환경에서 BLE 통신 모듈 시뮬레이션을 통해 수행되었다[10].

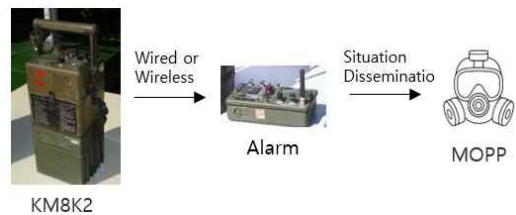


그림 2. 기존 화상방 상황 인지 및 조치(대대급)
Fig. 2. Existing CBRN situation awareness and response(Battalion level)

표 1. 기존 대비 반응속도 및 확산 방지율 비교
Table 1. Comparison of response time and containment efficiency

Item	Existing system	Proposed system
Average detection time	15 sec	3 sec
Information transmission time	30 sec	5 sec
Containment rate	42%	78%
parameter values	Number of nodes:20units, Deployment area:100m×100m, Communication range:20m	

V. 결론 및 향후 과제

본 연구에서는 CBRN 위협 상황에서 실시간 탐지와 경고가 가능한 Ad-hoc 통신 기반의 방독면 중심 방호체계를 제안하고, 시뮬레이션을 통해 기존 중앙집중형 구조 대비 빠른 대응 속도와 높은 확산 방지 효과를 확인하였다. 제안된 체계는 노드 간 자율 통신 구조를 바탕으로 통신 인프라가 파괴된 환경에서도 작동 가능하며, 개인 장비에 직접 감지와 통신 기능을 통합함으로써 사용자 개개인이 주체가 되는 자율적 방호 시스템을 실현할 수 있다. 이는 기존 체계의 한계인 탐지-분석 지연, 통신 인프라 의존성을 극복할 수 있는 실질적 대안이 된다.

향후 과제로는 본 시스템을 UAV, 로봇 플랫폼 등과 연계하여 공중 중계 노드 또는 기동형 분석 노드로 활용할 수 있는 구조로 확장하는 것이 필요하다. 또한 군용 전술통신체계, LTE-R, 위성통신, 전술 드론 등 기존 통신 인프라와의 융합을 통해 범용성과 전장 적응력을 확보하는 연구가 요구된다. 더불어, 센서 오염률을 줄이기 위한 AI 기반 데이터 분석 알고리즘과 사용자 맞춤형 인터페이스 최적화도 중요한 과제로 남아 있다.

References

[1] R. Damaševičius, N. Bacanin, and S. Misra, "From Sensors to Safety: Internet of Emergency Services (IoES) for Emergency Response and Disaster Management", *Journal of Sensor and Actuator Networks*, Vol. 12, No. 3, May 2023. <https://doi.org/10.3390/jsan12030041>.

[2] K. Cho, et al., "Analysis of Latency Performance of Bluetooth Low Energy Networks", *Sensors*, Vol. 15, No. 1, pp. 59-78, 2015. <https://doi.org/10.3390/s150100059>.

[3] U.S. Department of Homeland Security, "Planning Guidance for Response to a Nuclear Detonation", Homeland Security Council, 3rd Edition, 2023.

[4] North Atlantic Treaty Organization(NATO), Chemical, Biological, Radiological and Nuclear(CBRN) Defence Policy, NATO Official Text, 29 Jun. 2022.

[5] M. Kim, Y. Han, M. Choe, and J. Ryu, "Development of Zigbee-based Data Integration Control System for IoT Conversion of Wired Sensor System", *Journal of KIIT*, Vol. 22, No. 12, pp. 133-143, Dec. 2024. <https://doi.org/10.14801/jkiit.2024.22.12.133>.

[6] B. Kim, Y. Woo, and I. Kim, "A Delivery Path-Based Caching Scheme in Mobile Ad-hoc Networks", *Journal of KIIT*, Vol. 18, No. 1, pp. 41-48, Jan. 2020. <http://dx.doi.org/10.14801/jkiit.2020.18.1.41>.

[7] H. Seo and M. lee, "An Optimization model of Communication Node's deployment in TICN System", *Journal of JKIIICE*, Vol. 28, No. 9, pp. 1082-1093, Sep. 2024. <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2024.28.9.1082>.

[8] Z. Hosseinkhani and M. Nabi, "BMSim: An Event-Driven Simulator for Performance Evaluation of Bluetooth Mesh Networks", *IEEE Internet of Things Journal*, Vol. 11, No. 2, pp. 2139-2151, Jan. 2024. <http://dx.doi.org/10.1109/JIOT.2023.3291551>.

[9] J. Tosi, F. Taffoni, M. Santacatterina, R. Sannino, and D. Formica, "PPerformance Evaluation of Bluetooth Low Energy: A Systematic Review", *Sensor Networks*, Vol. 17, No. 12, Dec. 2017. <https://doi.org/10.3390/s17122898>.

[10] M. Polese, T. Zugno, and M. Zorzi., "Implementation of Reference Public Safety Scenarios in NS-3", *Proc. of the Workshop on ns-3*, Florence, Italy, Jun. 2019. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1902.06224>.