

## 고온 작업환경에서 디클로로메탄 유래 일산화탄소 중독 위험에 관한 서술적 고찰

심규진<sup>1</sup> · 권오현<sup>1</sup> · 이화평<sup>2</sup> · 최선행<sup>3,4,5\*</sup>

<sup>1</sup>서울과학기술대학교 일반대학원 안전공학과, <sup>2</sup>근로복지공단 대구병원,  
<sup>3</sup>충북대학교 의과대학 직업환경의학과, <sup>4</sup>충북대학교병원 직업환경의학과, <sup>5</sup>대전충청직업병안심센터

## A Narrative Review on the Risk of Carbon Monoxide Poisoning Derived from Dichloromethane in High-Temperature Occupational Environments

Gyu-Jin Sim<sup>1</sup> · Oh-Hyun Kwon<sup>1</sup> · Hwa-Pyung Lee<sup>2</sup> · Sun-Haeng Choi<sup>3,4,5\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Safety Engineering, Graduate School, Seoul National University of Science and Technology

<sup>2</sup>Department of Occupational and Environmental Medicine, Daegu Hospital,  
Korea Workers' Compensation and Welfare Hospital

<sup>3</sup>Department of Occupational and Environmental Medicine, College of Medicine, Chungbuk National University

<sup>4</sup>Department of Occupational and Environmental Medicine, Chungbuk National University Hospital

<sup>5</sup>Korea Occupational Diseases Surveillance Center, Chungbuk National University Hospital, Cheongju, Korea

### ABSTRACT

**Objectives:** Dichloromethane (DCM) is a volatile halogenated solvent whose industrial use in South Korea continues to expand. Although its regulation has focused on its chronic carcinogenicity, its acute toxicity via endogenous carbon monoxide (CO) metabolism is becoming increasingly critical with the acceleration of climate change. This review examines how summer heat waves amplify acute DCM poisoning risk and identifies key research gaps for the protection of South Korean workers.

**Methods:** A narrative review synthesized references on DCM toxicology, pharmacokinetics, and clinical poisoning cases, supplemented by physicochemical and climatological data from NIST, OSHA, and the Korea Meteorological Administration (KMA). The DCM vapor pressure-temperature relationship was quantified using the Antoine equation. Domestic exposure data and biological monitoring evidence were examined.


**Results:** DCM vapor pressure increases by approximately 80% as ambient temperature rises from 20°C to 35°C. COHb levels exceeding 10% produce symptoms indistinguishable from direct CO inhalation, with DCM-derived COHb persisting for up to 17 hours. Suspected cases reported to the Daejeon-Chungcheong Regional Occupational Disease Safety Center—including a fatality during water-tank waterproofing and a syncope event during use of a DCM-containing cleaning solution—revealed that workers were largely unaware that their symptoms reflected CO poisoning. There are currently no integrated domestic studies linking real-world use patterns, temperature-stratified airborne measurements, and worker COHb biomonitoring.


**Conclusions:** Current evidence cannot fully characterize the actual acute poisoning risk faced by South Korean workers handling DCM during summer heat waves. Further integrated research appears warranted on: (i) DCM usage and worker risk perception surveys; (ii) temperature-stratified workplace concentration measurements; and (iii) blood COHb biomonitoring during DCM-handling shifts. This review provides the scientific rationale.

**Key words:** Carbon monoxide poisoning, carboxyhemoglobin, climate change, dichloromethane, heat wave

\*Corresponding author: Sun-Haeng Choi, Tel: 043-269-6303, E-mail: [viopxo@chungbuk.ac.kr](mailto:viopxo@chungbuk.ac.kr)  
Department of Occupational and Environmental Medicine, Chungbuk National University Hospital, 776 1Sunhwan-ro, Seowon-gu, Cheongju-si, Chungcheongbuk-do 28644, Republic of Korea  
Received: June 8, 2026 Revised: June 17, 2026, Accepted: June 18, 2026

 Gyu-Jin Sim <https://orcid.org/0009-0003-3654-1036>

 Oh-Hyun Kwon <https://orcid.org/0009-0001-6069-6340>

 Sunhaeng Choi <https://orcid.org/0009-0001-4511-6977>

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.

## I. 서 론

디클로로메탄(dichloromethane, DCM, 또는 염화메틸렌, 이염화메탄,  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ )은 페인트 제거제, 금속 세척제(탈지제), 제약 산업의 화학 중간체, 추출 공정 용제, 냉매 등 다양한 산업 분야에서 광범위하게 사용되는 무색의 휘발성 할로젠화 탄화수소이다(ATSDR, 2000). 국내에서도 DCM은 작업환경측정 대상물질이자 관리대상유해물질, 특수건강진단대상물질로 지정되어 있으며, 화학물질 통계조사 결과 그 취급량과 사용 사업장 수는 지속적으로 증가하는 추세에 있다(Jeong et al., 2021; MoE, 2024).

역사적으로 DCM에 대한 직업 건강 및 규제 초점은 발암성과 간독성 등 주로 만성 독성에 편중되어 왔다(EPA, 2011; Schlosser et al., 2015). 미국 직업안전보건청(Occupational Safety & Health Administration, OSHA)을 비롯한 규제 기관들은 주로 장기적인 암 발생 위험 모델을 기반으로 8시간 시간가중평균(time-weighted average, TWA) 허용 노출 기준(permissible exposure limit, PEL)을 25 ppm으로 설정하고 있다(OSHA, 1997).

그러나 이러한 만성 독성 중심의 패러다임은 치명적인 급성 위험, 즉 DCM이 체내에서 일산화탄소(carbon monoxide, CO)로 대사되는 메커니즘을 간과하고 있다(Stewart et al., 1972; Andersen et al., 1991). 인체에 흡입된 DCM은 간의 사이토크롬 P450 2E1 (cytochrome P450 2E1, CYP2E1) 경로를 통해 대사되며, 이 과정에서 CO가 생성되어 혈액 내 헤모글로빈과 결합해 일산화탄소헤모글로빈(carboxyhemoglobin, COHb)을 형성한다(WHO, 1996; Schlosser et al., 2015). 이는 조직의 심각한 저산소증을 유발하며, 극심한 두통, 어지러움, 심계항진은 물론 극단적인 경우 급성 심정지와 같은 전형적인 일산화탄소 중독 증상을 나타낸다(Leikin et al., 1990; Shang et al., 2024).

더욱 심각한 문제는 DCM의 물리화학적 특성이 환경 조건에 매우 민감하게 반응한다는 점이다. DCM의 끓는점은  $39.6^\circ\text{C}$ 에 불과하여, 주변 온도 변화에 따라 증기압이 비선형적으로 증가한다(NIST, 2024). 전 지구적 기후변화가 가속화됨에 따라 작업 환경은 점점 더 극단적인 고온 및 고습 조건에 노출되고 있다. 2024년 한국은 1973년 기상 관측 이래 가장 더운 여름을 기록하였으며, 평균 기온  $25.6^\circ\text{C}$ 와 평년 대비 약 3배에 달

하는 20.2일의 열대야를 경험하였다(KMA, 2024). 이러한 고온·고습 환경에서는 휘발성 유기화합물의 증기압과 증발률이 기하급수적으로 증가한다는 사실이 보고되고 있다(Li et al., 2023; Zhu et al., 2024). 실제로 국내에서는 여름철에 환기장치와 에어컨이 고장난 뒤, 끓는점이  $32^\circ\text{C}$ 로 낮은 화학물질인 HCFC-141b (1,1-dichloro-1-fluoroethane)가 휘발하여 실내에서 근무하던 다수의 공장 노동자가 중독된 사례가 보고된 바 있다(Lee et al., 2009).

본 리뷰 논문이 제기하는 핵심 가설은 기후변화로 인한 고온 환경과 DCM 특유의 CO 대사 메커니즘이 결합하여 직업적 급성 중독의 '완벽한 폭풍(perfect storm)'을 형성할 수 있다는 것이다. 다만 이는 물리화학적 원리와 약동학적 메커니즘에 근거한 이론적 추론이며, 실측 자료를 통한 검증이 필요한 가설임을 밝혀둔다. 표준 조건( $20\text{--}25^\circ\text{C}$ )에서 안전하다고 여겨지는 적은 용량이라 할지라도, 이론적으로는 여름철 폭염 조건에서 공기 중 DCM 농도가 단시간에 위험한 수준까지 상승할 수 있을 것으로 추정된다.

실제로 충북대학교병원에 거점을 둔 대전충청직업병안심센터(KODSC, 2024)에는 최근 DCM 중독이 의심되는 사례들이 다수 접수되었다. 대표적으로 물탱크 방수 작업자가 DCM 중독으로 사망한 사례, DCM이 포함된 세척액을 취급하던 중 실신하여 일산화탄소 중독이 의심되었던 사례 등이 보고되었다. 이들 사례에서 공통적으로 확인된 점은, 노동자들이 물질안전보건자료(material safety data sheet, MSDS) 교육과 취급 작업 수행 과정에서 호흡곤란, 두통, 심계항진 등의 증상이 디클로로메탄 대사 산물인 일산화탄소에 의한 중독 증상임을 제대로 인식하지 못하고 있었다는 점이다. 이러한 인식의 공백은 초기 증상을 단순 피로나 온열질환으로 오인하게 만들어 응급 대응의 지연과 치명적 결과로 이어질 수 있다.

그러나 이러한 위험을 과학적으로 평가할 수 있는 국내 자료는 매우 제한적이다. 특히 (1) 실제 작업 현장에서의 DCM 사용 실태, (2) 여름철 고온 조건에서의 작업장 공기 중 DCM 농도, (3) DCM 취급 근로자의 작업 중 혈중 COHb 수준에 관한 통합적 실측 자료가 부재하다. 본 연구는 물리화학적 데이터, 약동학적 메커니즘, 그리고 최근의 치명적 중독 사례들을 통합 분석함으로써 기후변화 시대에 DCM 노출이 가지는 위험성을 재조명하고, 향후 추진되어야 할 실증 연구의 방향성과

그 시급성을 제시하고자 한다.

## II. 연구방법

### 1. 문헌 수집 및 선정

제본 분석 리뷰는 DCM의 독성학, 약동학, 임상 중독 사례, 그리고 작업환경 노출 평가 및 생체 모니터링을 다룬 국내외 문헌을 종합적으로 분석하였다. 문헌 검색은 PubMed, ScienceDirect, 한국학술지인용색인(Korea Citation Index, KCI)을 활용하였으며, 주요 검색어는 “dichloromethane”, “methylene chloride”, “carboxyhemoglobin”, “occupational exposure”, “biological monitoring”, “heat wave” 등으로 구성하였다. 또한 DCM의 물리적 특성과 최근 기후 통계, 국내 작업환경측정 자료를 미국 국립표준기술연구소(National Institute of Standards and Technology, NIST), OSHA, 한국 기상청(Korea Meteorological Administration, KMA), 한국산업안전보건공단(Korea Occupational Safety and Health Agency, KOSHA), 환경부(Ministry of Environment, MoE) 등 신뢰할 수 있는 데이터베이스에서 추가로 수집하였다.

### 2. 분석 프레임워크

#### 1) 물리화학적 분석

Antoine 방정식( $\log_{10}P = A - B/(C + T)$ )을 활용하여 15°C에서 40°C 사이의 온도 구배에 따른 DCM 증기압의 비선형적 증가를 계산하였다. DCM에 대한 Antoine 방정식 매개변수는 NIST 데이터베이스에서  $A = 4.53691$ ,  $B = 1327.016$ ,  $C = -20.474$ 로 적용하였다(NIST, 2024). 또한 최근 유체역학 연구를 바탕으로 고습도가 비수계 휘발성 액체의 증발 역학에 미치는 영향을 검토하였다(Li et al., 2023; Zhu et al., 2024).

#### 2) 약동학적 분석

생리학적 약동학(physiologically based pharmacokinetic, PBPK) 모델과 독성학적 프로파일을 이용하여 CYP2E1을 통한 DCM의 CO 대사 경로와 그에 따른 COHb 상승 메커니즘을 분석하였다(Andersen et al., 1991; WHO, 1996; ATSDR, 2000). 또한 DCM 노출 평가에 활용 가능한 생체 모니터링 지표(혈중 COHb, 호기 CO, 소변 중 미대사 DCM)의 특성과 적용 한계를 검토하였다(Sakai et al.,

2002; HSE, 2010; ACGIH, 2012).

### 3) 임상 사례 및 노출 자료 분석

제약 공장에서 발생한 급성 심정지 사례(Shang et al., 2024), 미국에서 발생한 85건의 사망 사례 분석(Hoang et al., 2021), 가구 도장공의 COHb 추적 사례(Manno et al., 1992) 등을 검토하여 노출 환경, COHb 수치, 그리고 치명적 결과 간의 상관관계를 도출하였다. 국내 자료로는 디클로로메탄 제조·사용 사업장 근로자의 공정별 작업환경측정 자료(Jeong et al., 2021)와 KOSHA의 작업환경측정 통계(KOSHA, 2023)를 분석하여, 국내 노출 실태 평가의 현황과 한계를 확인하였다.

## III. 결 과

### 1. DCM 유도성 일산화탄소 중독 및 저산소증 기전

단순한 용제 효과를 통해 중추신경계 억제를 유발하는 대부분의 휘발성 유기화합물(volatile organic compounds, VOCs)과 달리, DCM은 고유한 이중 독성 메커니즘을 가진다. 흡입된 DCM의 상당 부분은 간의 혼합 기능 산화효소 시스템, 특히 CYP2E1에 의해 대사된다(WHO, 1996; Schlosser et al., 2015). 이 산화 경로는 DCM을 포르밀 클로라이드(formyl chloride)로 변환시키며, 이는 자발적으로 분해되어 CO와 염산(hydrochloric acid, HCl)을 생성한다(NIOSH, 1986; ATSDR, 2000).

생성된 CO는 산소보다 약 200배 높은 친화력으로 헤모글로빈과 결합하여 COHb를 형성하고, 조직으로의 산소 운반을 심각하게 방해한다(Stewart et al., 1972). 연구에 따르면 500-1,000 ppm의 DCM에 노출될 경우 COHb 수치가 10% 이상으로 상승하며, 이 시점부터 두통, 구역질, 심계항진 등 저산소증의 임상 증상이 뚜렷하게 나타난다(DiVincenzo & Kaplan, 1981). 더욱이 DCM 대사에서 유래한 CO의 생물학적 반감기는 직접적인 CO 가스 흡입 시(약 5시간)보다 훨씬 길어, 지방 조직에 축적된 DCM이 서서히 방출되면서 CO가 지속적으로 생성되기 때문에 노출 후 17시간이 지나도 COHb 수치가 높게 유지된다(Fodor & Schlipkötter, 1973; Manno et al., 1992).

극도로 높은 농도에서 DCM은 미토콘드리아 호흡 사슬의 사이토크롬 c 산화효소(cytochrome c oxidase)를 직접 억제하여 세포 수준의 저산소성 손상을 더욱

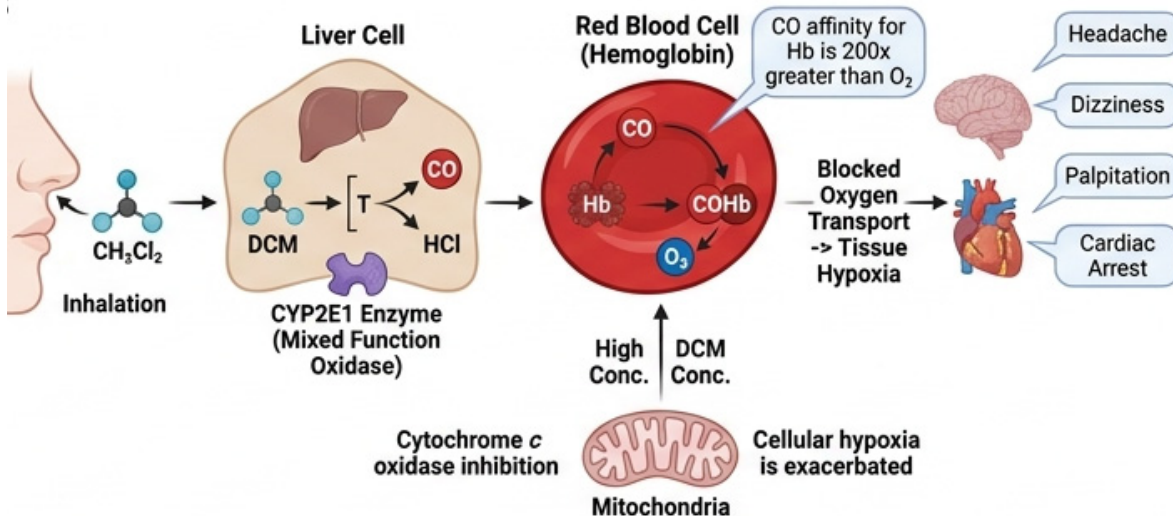


Figure 1. DCM metabolic pathway and CO-mediated hypoxia mechanism

Inhaled DCM is metabolized by hepatic CYP2E1 (mixed-function oxidase pathway) via formyl chloride to carbon monoxide (CO). The generated CO binds hemoglobin to form COHb, blocking tissue oxygen delivery and producing typical CO poisoning symptoms: headache, dizziness, palpitation, and cardiac arrest. At high concentrations, additional cellular hypoxia occurs via inhibition of mitochondrial cytochrome c oxidase.

Table 1. Clinical symptoms by COHb level following DCM exposure

| COHb level (%) | Clinical symptoms                                | Equiv. DCM (ppm) | Risk level |
|----------------|--|------------------|------------|
| < 3            | Asymptomatic (normal baseline in non-smokers)    | < 100            | Normal     |
| 3-5            | Mild headache, reduced exercise tolerance        | 100-200          | Low        |
| 5-10           | Headache, dizziness, nausea                      | 200-500          | Moderate   |
| 10-20          | Severe headache, confusion, palpitation, dyspnea | 500-1,000        | High       |
| 20-30          | Disorientation, visual disturbance, syncope      | 1,000-2,000      | Dangerous  |
| > 30           | Seizure, coma, cardiac arrest, death             | > 2,000          | Fatal      |

COHb: carboxyhemoglobin; DCM: dichloromethane. Equivalent DCM exposure concentrations are approximate values and vary according to exposure duration, ventilation conditions, and individual metabolic capacity. Unlike direct CO inhalation, DCM-derived COHb peaks 4-8 hours after exposure due to continued fat depot metabolism (DiVincenzo & Kaplan, 1981; Manno et al., 1992; Stewart et al., 1972).

가중시킨다(Lehnebach et al., 1995). DCM 대사 경로와 CO 매개 저산소증 기전은 Figure 1에, DCM 노출에 따른 COHb 수준별 임상 증상은 Table 1에 정리하였다.

2. 기후변화의 영향: 고온과 고습 환경의 위험성

DCM은 끓는점이 39.6°C로 매우 낮아 주변 온도 변화에 극도로 민감하게 반응한다(NIST, 2024). Antoine 방정식을 적용하여 산출한 온도별 DCM 증기압은 Table 2 및 Figure 2에 제시하였다. 작업장 온도가 표준 조건인 20°C에서 여름철 폭염 조건인 35°C로 상승

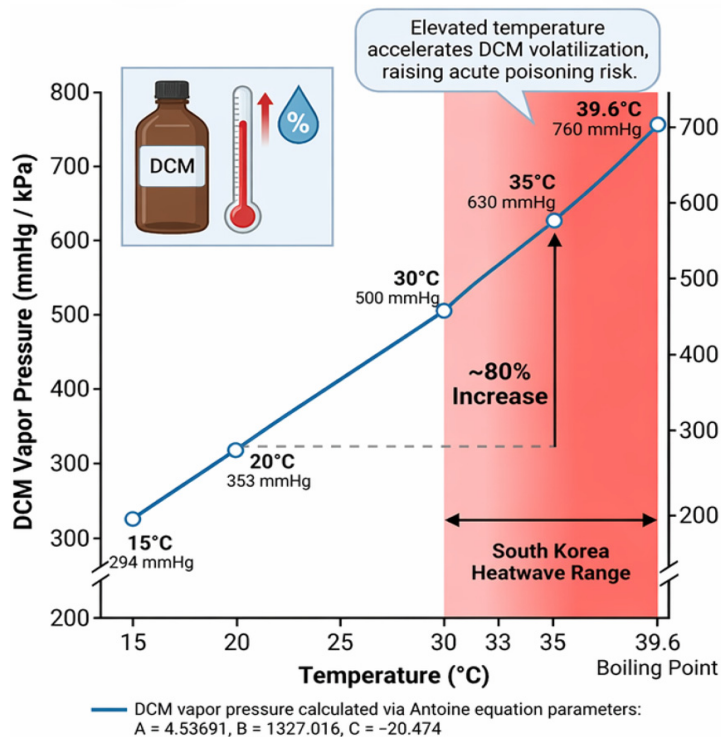
할 경우 DCM의 증기압은 약 80% 증가한다. 이러한 비선형적 증가는 여름철에 DCM의 증발률과 공기 중 농도가 급격하게 치솟음을 의미한다.

뿐만 아니라 최근 유체역학 연구들은 높은 주변 습도가 비수계 휘발성 액체(DCM 등)의 증발을 가속화할 수 있음을 보고하였다. 휘발성 액적 표면에 수증기가 응결되면서 방출되는 잠열(latent heat)이 용제의 증발을 촉진하는 에너지원으로 작용하는 것으로 설명된다(Li et al., 2023). 이를 종합하면, 한국의 2024년 여름과 같이 심각한 폭염과 높은 습도가 동반된 환경에서는 표준 용량의 DCM을 사용하더라도 물리화

**Table 2.** DCM vapor pressure by temperature calculated using the Antoine equation

| Temp. (°C) | Vapor pressure (kPa) | Vapor pressure (mmHg) | Increase vs. 20°C | Saturated conc. (ppm) |
|------------|----------------------|-----------------------|-------------------|-----------------------|
| 15         | 39.2                 | 294                   | -16%              | ~386,000              |
| 20         | 46.8                 | 351                   | Baseline          | ~462,000              |
| 25         | 57.3                 | 430                   | +22%              | ~565,000              |
| 30         | 69.6                 | 522                   | +49%              | ~687,000              |
| 33         | 77.0                 | 578                   | +65%              | ~760,000              |
| 35         | 84.0                 | 630                   | +80%              | ~829,000              |
| 39.6       | 101.3                | 760                   | +117%             | Boiling point reached |

Antoine equation parameters for DCM: A = 4.53691, B = 1327.016, C = -20.474 (NIST, 2024). Saturated concentration represents the theoretical maximum airborne concentration in a closed system. Actual workplace concentrations vary with ventilation, application method, and surface area. The range 30–39.6°C corresponds to Korean summer heat wave temperatures.



**Figure 2.** Nonlinear increase in DCM vapor pressure with rising temperature

The Antoine equation ( $\log_{10}P = A - B/(C + T)$ ) is applied to plot DCM vapor pressure from 15°C to 39.6°C (boiling point). An approximately 80% increase in vapor pressure is observed at 35°C relative to the 20°C baseline, indicating that airborne DCM concentrations may surge rapidly during summer heat waves. The shaded zone indicates the South Korean summer heat wave temperature range (30–39.6°C).

학적 시너지 효과로 인해 단시간에 고농도의 유해 미세환경이 조성될 가능성이 있을 것으로 추정된다. 다만 이러한 추정은 실측 자료를 통한 검증이 필요하다. 한국의 폭염일수 추세는 Table 3 및 Figure 3에 정리하였다.

### 3. 치명적 급성 중독 사례 분석

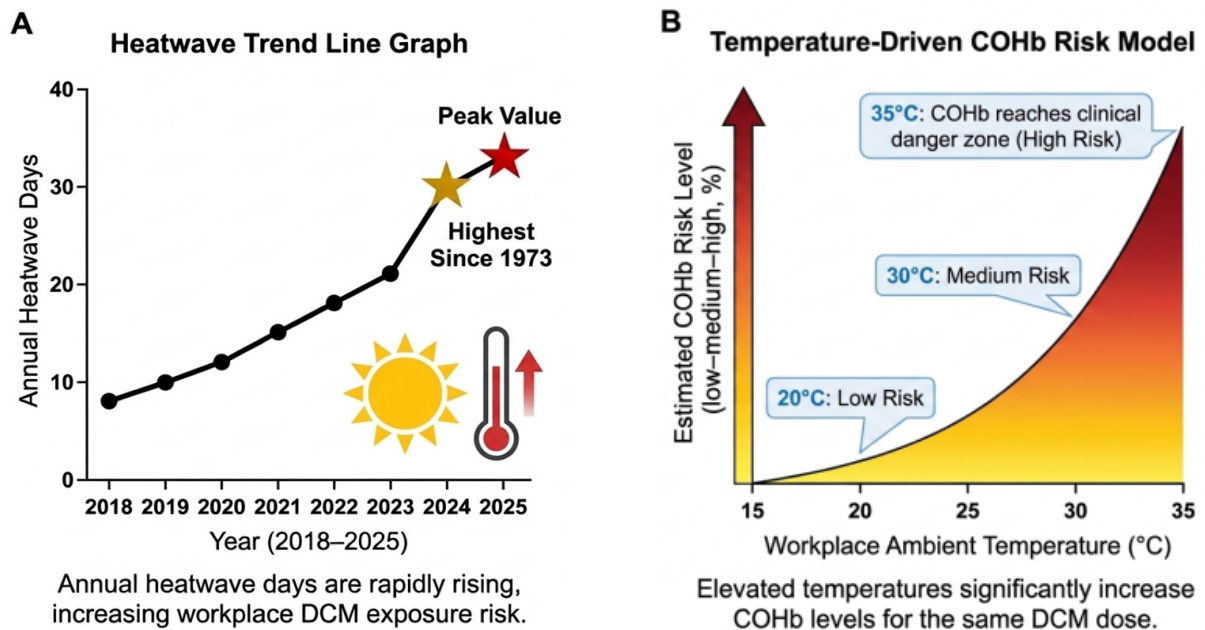
고온과 대사 메커니즘이 결합된 이론적 위험성은 실제 임상 사례들에서 비극적으로 확인된다. 대표적 사례들을 Table 4에 요약하였다.

Shang et al.(2024)은 제약 공장의 49세 남성 작업

**Table 3.** Heat wave days trend in South Korea (2018–2025)

| Year | Heat wave days | Summer mean temp. (°C) | Tropical night days | Notes                    |
|------|----------------|------------------------|---------------------|--------------------------|
| 2018 | 31.5           | 25.4                   | 17.7                | Record high heat wave    |
| 2019 | 13.8           | 24.5                   | 10.5                | -                        |
| 2020 | 9.8            | 24.1                   | 7.3                 | Prolonged monsoon season |
| 2021 | 8.1            | 24.3                   | 6.8                 | -                        |
| 2022 | 17.0           | 24.8                   | 11.2                | -                        |
| 2023 | 12.5           | 24.6                   | 9.8                 | -                        |
| 2024 | 28.0           | 25.6                   | 20.2                | Hottest since 1973       |
| 2025 | 29.7           | 25.8                   | 21.0                | Projected (Jan–May data) |

Source: Korea Meteorological Administration (KMA, 2024). Heat wave day defined as maximum temperature  $\geq 33^\circ\text{C}$ . Tropical night defined as minimum overnight temperature  $\geq 25^\circ\text{C}$ . Trend: +0.71 heat wave days per year. The 2025 figure is projected based on January–May data.



**Figure 3.** South Korean heat wave days trend, and temperature-dependent DCM poisoning risk model

(A) Annual trend in South Korean heat wave days (2018–2025), showing a mean increase of +0.71 days per year. (B) Projected COHb risk model by temperature: for an equivalent DCM exposure dose, COHb levels increase nonlinearly with higher workplace temperatures, substantially elevating the risk of acute poisoning.

자가 배관 누출로 인해 DCM에 노출된 직후 의식을 잃고 추락하여 급성 심정지를 일으킨 사례를 보고하였다. 응급실 내원 당시 동맥혈 가스 분석 결과 심각한 저산소증(동맥혈 산소포화도 arterial oxygen saturation, SaO<sub>2</sub> 71%), 산증(pH 7.2)과 함께 COHb 수치가 6.4%로 측정되었다. 적극적인 심폐소생술과 35일간의 중환자실 치료를 통해 다행히 생존하였으나, 이 사례는 DCM 매개 CO 중독이 유발하는 즉각적이고 치명적인

심혈관계 붕괴를 여실히 보여준다.

Pacheco et al.(2016)은 페인트 제거 공장에서 쓰러진 27세 작업자의 사례를 보고하였다. 이 환자의 COHb 수치는 23.9%에 달하였으며, 회복을 위해 고압산소치료(hyperbaric oxygen therapy, HBOT)가 필수적이었. Hoang et al.(2021)의 연구는 1980년부터 2018년까지 미국에서 발생한 85건의 DCM 관련 사망 사례를 분석하였다. 직업적 사망자(중위 연령 31세)의 대다수는

**Table 4.** Summary of acute DCM poisoning cases

| Case | Reference             | Patient       | Work environment                | COHb (%)  | Key findings and outcome   |
|------|-----------------------|---------------|---------------------------------|-----------|--|
| 1    | Shang et al. (2024)   | 49M           | Pharmaceutical plant, pipe leak | 6.4       | SaO <sub>2</sub> 71%, pH 7.2, cardiac arrest; survived (35d ICU) |
| 2    | Pacheco et al. (2016) | 27M           | Paint-stripping plant           | 23.9      | Loss of consciousness; survived (HBOT)                           |
| 3    | Leikin et al. (1990)  | 5 workers     | Confined space, paint removal   | 8-12      | 2 fatalities, 3 survivors  |
| 4    | Hoang et al. (2021)   | 85 fatalities | Various (56% paint removal)     | up to 14  | Median age 31; 56% without respirator                            |
| 5    | Manno et al. (1992)   | 35M           | Furniture refinishing           | up to 8.9 | Linear COHb rise with work hours                                 |

COHb: carboxyhemoglobin; ICU: intensive care unit; HBOT: hyperbaric oxygen therapy; M: male.

육실 등 환기가 불량한 밀폐 공간에서 페인트 제거 작업을 하던 중 사망하였으며, 부검을 통한 독성학 보고서에 따르면 COHb 수치는 최대 14%까지 나타났다. 또한 Manno et al.(1989)은 DCM에 노출된 작업자에서 측정된 높은 혈중 COHb 수치가 사망과 직접적으로 연관된 사례를 보고하여, DCM 매개 CO 중독이 치명적 결과로 이어질 수 있음을 일찍이 제시하였다.

특히 Manno et al.(1992)의 사례 보고는 본 리뷰의 후속 연구 필요성과 직결되는 중요한 근거를 제공한다. 가구 도장공이었던 35세 남성에서 동일 작업일 내 시간 경과에 따른 혈중 COHb 수치를 반복 측정한 결과, COHb는 근무 시간과 선형적으로 비례하여 증가하였으며, 작업환경 공기 중 DCM 농도로부터 예측한 COHb 값과 실측치가 매우 유사하였다. 이는 작업환경 공기 측정(area sampling)과 생체 모니터링(COHb 측정)을 병행할 경우 실제 노출량을 정량적으로 평가할 수 있음을 시사한다.

#### 4. 고온 환경에서의 시너지 위험 요인

여름철 DCM 독성을 증폭시키는 시너지 위험 요인들을 Table 5에 정리하였다. 고온은 Antoine 방정식에 따른 증기압 비선형 증가를 통해 공기 중 농도를 급격히 상승시키며, 고습도는 잠열 응결을 통해 증발률을 가속화한다(Li et al., 2023). 톨루엔이나 벤젠과 같은 방향족 탄화수소에 함께 노출될 경우 CYP2E1 효소가 유도되어 DCM의 CO 전환 속도가 가속화되며(Pankow et al., 1991), 고온 환경의 피부혈관 확장은 경피 흡수를 증가시켜 체내 총 부하량을 늘린다(Takeshita et al., 2000). 환기 불량, 신체 작업 부하, 탈수 등이 이러한 위험 요인들과 결합할 때 치명적인 결과로 이어질 수 있다.

### IV. 고찰

#### 1. 만성 위해 중심 패러다임의 한계

본 리뷰의 결과는 현재의 직업 건강 평가 프레임워크

**Table 5.** Synergistic risk factors amplifying DCM toxicity in summer conditions

| Risk factor               | Mechanism   | Effect on toxicity         |
|---------------------------|---|----------------------------|
| High temperature (>30°C)  | Vapor pressure rises non-linearly per Antoine equation            | ↑ ↑ Airborne concentration |
| High humidity (>70% RH)   | Latent heat from water vapor condensation accelerates evaporation | ↑ Evaporation rate         |
| Physical workload         | Increased respiratory rate and cardiac output                     | ↑ Inhaled dose             |
| Co-exposure to aromatics  | CYP2E1 enzyme induction (Pankow et al., 1991)                     | ↑ ↑ CO production rate     |
| Inadequate ventilation    | Accumulation in confined space                                    | ↑ ↑ ↑ Concentration surge  |
| Heat-induced vasodilation | Increased transdermal absorption (Takeshita et al., 2000)         | ↑ Body burden              |
| Dehydration               | Reduced hepatic blood flow, metabolic changes                     | Prolonged COHb elevation   |

RH: relative humidity; CYP2E1: cytochrome P450 2E1; CO: carbon monoxide; COHb: carboxyhemoglobin. Arrows indicate magnitude of effect: ↑ moderate; ↑ ↑ substantial; ↑ ↑ ↑ severe.

가 DCM의 급성 독성 위험 평가에 있어 심각한 사각지대를 가지고 있음을 보여준다. OSHA의 PEL 25 ppm 및 단시간노출기준(short-term exposure limit, STEL) 125 ppm과 같은 규제 기준은 표준 온도 및 압력(일반적으로 20-25°C)을 가정하여 설정되었다(OSHA, 1997). 이는 기후변화로 인해 빈발하는 극단적인 여름철 폭염 조건에서 기하급수적으로 증가하는 휘발성을 전혀 반영하지 못한다(NIST, 2024; Zhu et al., 2024). 고온 환경에서 DCM을 사용할 경우 급격한 기화로 일반적인 환기 시스템이 무력화될 가능성이 있으며, 겨울철에 안전하게 취급할 수 있는 적은 용량이 여름철에는 치명적인 독가스로 돌변할 수 있다. 그러나 이러한 추론은 물리화학적 모델과 단편적인 임상 사례에 의존한 것이며, 실제 한국의 여름철 고온 작업환경에서 DCM이 어느 정도까지 공기 중 농도를 형성하는지에 대한 정량적 실측 자료는 사실상 부재하다.

## 2. 증상의 비특이성과 진단의 어려움

DCM 매개 CO 중독의 위험은 증상의 비특이성 때문에 더욱 가중된다. 작업자들이 겪는 두통, 어지러움, 호흡곤란, 심계항진은 여름철 작업장에서 흔히 발생하는 열사병이나 열탈진과 임상적으로 구별이 어렵다(Leikin et al., 1990). 앞서 서론에서 언급한 대전충청직업병안심센터의 의심 사례들과 같이, 작업자 본인이 이러한 증상을 단순 피로나 더위 탓으로 돌리거나, 응급 의료가 이를 온열 질환으로 오인할 경우 기저에 있는 CO 중독을 치료하기 위한 고유량 산소 투여 등 필수적인 응급처치가 지연되어 치명적인 결과로 이어질 수 있다(Pacheco et al., 2016; KODSC, 2024; Shang et al., 2024).

더욱이 실제 작업 환경에서는 여러 화학물질에 복합적으로 노출되는 경우가 많다. 톨루엔이나 벤젠과 같은 방향족 탄화수소에 함께 노출될 경우 CYP2E1 효소 활성이 유도되어 DCM이 CO로 전환되는 속도가 가속화되며, 결과적으로 COHb 수치가 더욱 치솟게 된다(Pankow et al., 1991). 또한 고온 환경에서는 땀 분비와 혈관 확장으로 인해 피부 투과성이 증가하므로, DCM의 경피 흡수가 촉진되어 체내 총 부하량(body burden)을 증가시킬 수 있다(Takeshita et al., 2000). DCM 유래 CO의 반감기가 약 17시간으로 연장되는 점은 추가적인 임상적 과제를 제시한다(Fodor & Schlipkötter, 1973). 여름철 근무 중 노출된 작업자는

퇴근 후에도 지방 조직에서 DCM이 서서히 방출·대사되면서 COHb가 계속 축적될 수 있어, 노출 중단 후 수 시간 뒤에 증상이 최고조에 달할 수 있다(Manno et al., 1992).

## 3. 국내 연구의 공백

국내에서 DCM은 산업안전보건법에 따른 작업환경 측정 대상물질(측정 주기 6개월), 관리대상유해물질, 특수건강진단대상물질(주기 12개월)로 지정되어 있으며, 환경부 화학물질 통계조사 결과 그 취급량과 사용 사업장 수는 지속적으로 증가하는 추세에 있다(MoE, 2024). KOSHA의 작업환경측정 통계 분석에서도 DCM은 노출지수 4등급에 속하는 '초고위험업종'이 존재하는 거의 유일한 유기화합물로 보고되어, 국내 우선관리 대상으로 분류되어 있다(KOSHA, 2023).

Jeong et al.(2021)의 연구는 국내 DCM 제조·사용 사업장의 작업환경측정 자료를 분석한 거의 유일한 체계적 보고로, 공정별 노출 수준에 큰 편차가 존재하며 일부 공정에서는 노출 기준을 초과하는 수준의 노출이 발생함을 보였다. 그러나 이 연구를 포함한 국내 자료들은 (1) 표준 조건의 단기 측정값에 기반하며, (2) 여름철 고온 시기와 그 외 시기의 농도 차이를 분석하지 않았고, (3) 작업자의 생체 모니터링 자료(혈중 COHb, 호기 CO, 소변 중 미대사 DCM)와 연계되어 있지 않다는 공통된 한계를 가진다.

이러한 자료의 공백은 일선 현장에서 더욱 심각한 양상으로 나타난다. 대전충청직업병안심센터에 접수된 의심 사례들에서 확인된 바와 같이, 다수의 노동자들은 MSDS 교육과 실제 작업 수행 과정 모두에서 DCM이 체내에서 일산화탄소로 대사된다는 사실, 그리고 두통·어지러움·호흡곤란·심계항진 등의 증상이 그 결과로 나타나는 일산화탄소 중독 증상이라는 사실을 제대로 인식하지 못하고 있었다(KODSC, 2024). 이는 단순히 개인의 교육 부족 문제가 아니라, 국내 직업 건강 관리 체계가 DCM을 여전히 '만성 발암물질' 중심으로 다루어 왔으며, 급성 CO 중독 위험에 대한 위해 소통(risk communication)과 작업자 교육이 미흡함을 시사한다.

국제적으로는 미국정부산업위생사협의회(American Conference of Governmental Industrial Hygienists, ACGIH)가 DCM에 대한 생체노출지수(biological exposure index, BEI)를 소변 중 미대사 DCM 0.3

mg/L(근무 교대 종료 시)로, 영국 보건안전청(Health and Safety Executive, HSE)은 호기 종말 CO 30 ppm을 생체모니터링 가이드스 값(biological monitoring guidance value, BMGV)으로 권고하고 있다(HSE, 2010; ACGIH, 2012). Sakai et al.(2002)과 Ukai et al.(2019)은 일본 작업장에서 작업환경 공기 중 DCM 농도와 소변 중 DCM 농도가 강한 선형 상관관계( $r = 0.70-0.85$ )를 보고하였다. 그러나 국내에서는 이러한 생체 모니터링이 일상적인 직업 건강 관리에 통합되어 있지 않으며, 특히 혈중 COHb 측정은 응급의학적 진단 목적 외에는 작업장 노출 평가 도구로 거의 활용되지 않고 있다.

종합하면, DCM 취급 사업장에서 ‘고온 → 증기압 상승 → 공기 중 농도 증가 → 흡입량 증가 → 체내 COHb 상승 → 임상 증상 발현’이라는 일련의 인과 사슬을 실증적으로 입증할 수 있는 국내 자료는 현재 존재하지 않는다. 동시에 일선 작업자들의 위험 인식 또한 부족한 것으로 보고된다. 이는 기후변화 시대에 적절한 위험성 평가와 근로자 건강 보호를 위해 향후 보완이 필요한 연구의 공백으로 판단된다.

## V. 결 론

기후변화로 인한 폭염의 일상화는 디클로로메탄의 휘발성을 극대화하고 체내 일산화탄소 대사를 촉진하여 급성 독성의 위험을 증폭시킬 수 있다(Li et al., 2023; NIST, 2024). 이러한 환경에서 DCM 노출의 일차적 위험은 장기적인 발암성이 아니라, 즉각적이고 치명적인 급성 저산소증 및 심정지일 가능성이 높으며(Hoang et al., 2021; Shang et al., 2024), 그 증상은 일반적인 일산화탄소 중독과 동일하게 두통, 어지러움, 호흡곤란, 심계항진 등으로 나타난다(Stewart et al., 1972).

그러나 본 리뷰가 확인한 가장 중대한 사실은 두 가지이다. 첫째, 한국에서 DCM 취급 실태, 여름철 고온 조건에서의 작업장 농도, 그리고 작업자의 혈중 COHb 수준을 통합적으로 분석한 실증 연구가 사실상 부재하다는 점이다. 둘째, 대전충청직업병안심센터에 접수된 의심 사례들에서 드러난 바와 같이, 일선 노동자들은 자신이 경험하는 두통·호흡곤란·심계항진 등의 증상이 DCM 대사 산물인 일산화탄소에 의한 중독 증상이라는 사실을 제대로 인식하지 못하고 있다는 점이다(KODSC, 2024).

따라서 향후 다음과 같은 통합적 연구가 요구될 것으로 보인다. 첫째, 공정별·업종별 DCM 실제 사용 실태와 작업자의 위험 인식에 대한 체계적 현장 조사 연구이다. 단순한 사용량 조사를 넘어 MSDS 교육의 실효성과 작업자가 인지하고 있는 DCM의 독성 기전(특히 CO 대사 경로) 및 자각 증상에 대한 인식 수준을 평가하는 것이 바람직하다. 둘째, 동일 작업장·동일 공정에서 폭염 시기와 비폭염 시기의 작업장 공기 중 DCM 농도를 비교 측정하는 시계열 연구이다. 측정 시점의 작업장 온도, 상대습도, 환기 조건을 함께 기록한 다변량 분석을 통해 ‘온도 보정 작업환경 평가 모델’의 근거를 마련할 수 있다. 셋째, DCM 취급 작업자의 작업 전·중·후 혈중 COHb를 시계열적으로 측정하는 생체 모니터링 연구이다(Manno et al., 1992; Sakai et al., 2002). 이러한 통합적 연구가 축적된다면, 기후변화 시대에 DCM이 가지는 위험성을 보다 객관적으로 평가하고 근거에 기반한 근로자 건강 보호 체계를 마련하는 데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 대전충청직업병안심센터 보고사례를 기반으로 위 연구를 시작하게 되었습니다. 직업병안심센터에 감사의 말 전합니다.

## 이해관계

본 연구에 대한 저자들의 이해관계 충돌은 없음을 선언합니다.

## References

- ACGIH. Documentation of the threshold limit values and biological exposure indices. 7th ed. Cincinnati: American Conference of Governmental Industrial Hygienists; 2012
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). Toxicological profile for methylene chloride (update). Atlanta: U.S. Department of Health and Human Services; 2000
- Andersen ME, Clewell HJ, Gargas ML, MacNaughton MG, Reitz RH, et al. Physiologically based pharmacokinetic modeling with dichloromethane,

- its metabolite, carbon monoxide, and blood carboxyhemoglobin in rats and humans. *Toxicol Appl Pharmacol* 1991;108(1):14-27
- DiVincenzo GD, Kaplan CJ. Uptake, metabolism, and elimination of methylene chloride vapor by humans. *Toxicol Appl Pharmacol* 1981;59(1):130-140
- Fodor GG, Schlipkötter HW. Die kohlenmonoxidge fährdung durch dichlormethan(methylenchlorid). *Zentralbl Arbeitsmed* 1973;23(6):173-178
- Health and Safety Executive(HSE). Biological monitoring guidance value(BMGV) for dichloromethane [Internet]. Buxton: Health and Safety Laboratory; 2010 [cited 2025 May]. Available from: [https://www.hsl.gov.uk/media/1661166/bmgv\\_dcm.docx](https://www.hsl.gov.uk/media/1661166/bmgv_dcm.docx)
- Hoang A, Fagan K, Cannon DL, Rayasam SDG, DeLorey MN, et al. Assessment of methylene chloride-related fatalities in the United States, 1980-2018. *JAMA Intern Med* 2021;181(6):797-805
- Jeong SJ, Bae GW, Lee NR. Comparison of work environment monitoring values and ECETOC TRA model values for process-specific exposure levels among workers in dichloromethane manufacturing and using businesses in Korea. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2021;31(4):317-330
- Korea Meteorological Administration(KMA). 2024 abnormal climate report[Internet]. Seoul: KMA; 2024 [cited 2025 May]. Available from: <https://www.weather.go.kr>
- Korea Occupational Disease Surveillance Center, DaejeonChungcheong Regional Center. Cheongju: Chungbuk National University Hospital; 2024 [cited 2025 May]. Available from: <https://www.cbnuh.or.kr/kodsc/>
- Korea Occupational Safety and Health Agency(KOSHA). Analysis of workplace environment measurement data for hazardous chemical substances. Ulsan: KOSHA Research Report; 2023
- Lee HP, Lee CY, Lee JH, Lee SW, Yang JH, et al. Follow-up results of patients with acute lung injury after 1,1-dichloro-1-fluoroethane (HCFC-141b) exposure. *Proceedings of the 43rd Autumn Conference of the Korean Society of Occupational and Environmental Medicine, Korea*. 2009. p. 656-657
- Lehnebach A, Kühn C, Pankow D. Dichloromethane as an inhibitor of cytochrome c oxidase in different tissues of rats. *Arch Toxicol* 1995;69(3):180-184
- Leikin JB, Kaufman D, Lipscomb JW, Burda AM, Hryhorczuk DO. Methylene chloride: report of five exposures and two deaths. *Am J Emerg Med* 1990;8(6):534-537
- Li X, Meijer JG, Lohse D. High humidity enhances the evaporation of non-aqueous volatile sprays. *J Fluid Mech* 2023;956:A19
- Manno M, Chirillo R, Daniotti G, Cocheo V, Albrizio F. Carboxyhaemoglobin and fatal methylene chloride poisoning. *Lancet* 1989;334(8666):274
- Manno M, Ruge M, Cocheo V. Double fatal inhalation of dichloromethane. *Hum Exp Toxicol* 1992;11(6):540-545
- Ministry of Environment(MoE). Chemical statistical survey results: dichloromethane[Internet]. Sejong: Chemical Information System(ICIS); 2024 [cited 2025 May]. Available from: <https://icis.me.go.kr>
- National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). Current intelligence bulletin 46: methylene chloride. Cincinnati: DHHS(NIOSH); 1986. Publication No. 86-114
- National Institute of Standards and Technology(NIST). Methylene chloride - Antoine equation parameters [Internet]. NIST Chemistry WebBook; 2024 [cited 2025 May]. Available from: <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C75092&Mask=4>
- Occupational Safety and Health Administration(OSHA). Occupational exposure to methylene chloride: final rule. *Fed Regist* 1997;62(7):1494-1619
- Pacheco C, Magalhães R, Fonseca M, Silveira P, Brandão I. Accidental intoxication by dichloromethane at work place: clinical case and literature review. *J Acute Med* 2016;6(2):43-45 (<http://doi.org/10.1016/j.jacme.2016.04.001>)
- Pankow D, Matschiner F, Weigmann HJ. Influence of aromatic hydrocarbons on the metabolism of dichloromethane to carbon monoxide in rats. *Toxicology* 1991;68(1):89-100
- Sakai T, Morita Y, Wakui C. Biological monitoring of workers exposed to dichloromethane, using head-space gas chromatography. *J Chromatogr B* 2002; 778(1-2):245-250
- Schlosser PM, Bale AS, Gibbons CF, Wilkins A, Cooper GS. Human health effects of dichloromethane: key findings and scientific issues. *Environ Health Perspect* 2015;123(2):114-122 (<http://doi.org/10.1289/ehp.1308030>)
- Shang R, Tian Q, Liu Y, Liu H, Zhang X, et al. Case report: sudden death caused by methylene chloride poisoning. *Front Pharmacol* 2024;15:1471744 (<http://doi.org/10.3389/fphar.2024.1471744>)

- Stewart RD, Fisher TN, Hosko MJ, Peterson JE, Baretta ED, et al. Carboxyhemoglobin elevation after exposure to dichloromethane. *Science* 1972;176(4032):295-296
- Takeshita H, Mogi K, Yasuda T, Mori K, Nakashima Y, et al. Postmortem absorption of dichloromethane: a case study and animal experiments. *Int J Legal Med* 2000;114(1-2):96-100
- U.S. Environmental Protection Agency(EPA). Toxicological review of dichloromethane(methylene chloride). EPA/635/R-10/003F. Washington, D.C.: EPA; 2011
- Ukai H, Inui S, Takada S, Dendo J, Ogawa J, et al. Biological monitoring of occupational exposure to dichloromethane by means of urinalysis for un-metabolized dichloromethane. *Int Arch Occup Environ Health* 2019;92(5):695-703
- World Health Organization(WHO). Methylene chloride. Environmental health criteria 164, 2nd ed. Geneva: WHO; 1996
- Zhu Y, Guo S, Liang W. A literature review investigating the impact of temperature and humidity on volatile organic compound emissions from building materials. *Build Environ* 2024;262:111806

**<저자정보>**

심규진(박사), 권오현(박사), 이화평(의사), 최선행(조교수)