

## 화학사고 대응을 위한 시간별 급성노출기준 참고치 산정 - 폼알데하이드 사례 -

김은채\*  · 조용성\*\*  · 이청수\*\*\*  · 양원호\*  · 황승울\*\*\*  · 박지훈\*\*\*† 

\*대구가톨릭대학교 산업보건학과, \*\*환경부 화학물질안전원 사고예방심사2과,  
\*\*\*환경부 화학물질안전원 사고대응총괄과

## Estimation of Temporal Acute Exposure Guideline Levels for Emergency Response - A Brief Case using Formaldehyde -

Eunchae Kim\*, Yong-Sung Cho\*\*, Chung-Soo Lee\*\*\*, Wonho Yang\*,  
Seung-Ryul Hwang\*\*\*, and Jihoon Park\*\*\*†

*\*Department of Occupational Health, Daegu Catholic University*

*\*\*Accident Prevention Assessment Division 2, National Institute of Chemical Safety, Ministry of Environment*

*\*\*\*Accident Response Coordination Division, National Institute of Chemical Safety, Ministry of Environment*

### ABSTRACT

**Objectives:** This study aimed to provide temporal Acute Exposure Guideline Levels (AEGL) for a hazardous substance as a pilot study.

**Methods:** As one of the substances designated by the Korea Ministry of Environment as requiring preparations for potential accidents, formaldehyde was selected to estimate the AEGLs. The calculation was based on Haber's formula ( $C^n \times t = k$ ) using valid toxicity data (for humans/animals). A total of 96 points of AEGL levels were provided using an interval of five minutes over eight hours.

**Results:** The AEGL-1 and 2 values were constant for the entire exposure duration at 0.9 ppm and 14 ppm, respectively. The values were obtained from clinical/animal tests, and the adaptation effect after a given exposure duration was also considered. AEGL-3 was based on animal toxicity data, and it was estimated from 127 ppm for the initial five minutes to 35 ppm for eight hours.

**Conclusions:** More specific AEGL levels for formaldehyde could be obtained in this study using toxicity data with Haber's formula. Based on this methodology, it would be also possible to estimate AEGL levels that can be used at the scene of a chemical accident for other substances requiring preparation for potential accidents.

**Key words:** Chemical accident, Acute Exposure Guideline Level, emergency response, health effects

## I. 서 론

2012년 구미에서 발생한 불산 누출사고를 계기로 화학물질관리법의 재정비와 화학물질등록 및 평가

등에 관한 법률 제정 등 화학안전관리의 기반이 마련되었으나, 매년 크고 작은 화학 사고가 지속적으로 발생하고 있다.<sup>1)</sup> 화학사고는 대부분 불안정한 요인에 기인하거나 자연 재해에 의한 2차 피해형태로

†Corresponding author: National Institute of Chemical Safety, 270, Osongsaengmyeong 11-ro, Osong-eup, Heungdeok-gu, Cheongju-si, Chungcheongbuk-do, 28164, Republic of Korea. Tel: +82-43-830-4164, Fax: +82-43-830-4199, E-mail: ichkann@korea.kr

Received: 1 April 2021, Revised: 20 April 2021, Accepted: 20 April 2021

발생한다. 각종 화학산업사고, 테러 등 예기치 않게 발생하는 사건(event)은 필연적으로 화학물질 누출을 동반하게 되는데, 누출된 물질의 확산 정도에 따라 개인이나 인근 지역사회 인구집단이 단시간 내 다량 또는 고농도의 유해화학물질에 노출될 수 있으며, 심각한 재난으로도 이어질 수 있다.<sup>2)</sup>

화학사고 발생 시 비상대피계획 마련 및 노출로 인한 건강피해를 최소화하기 위해 각 전문기관 또는 위원회에서는 물질별 노출기준을 설정하여 제시하고 있다. 대표적인 비상노출기준으로 미국산업위생학회(American Industrial Hygiene Association, AIHA)의 비상대응계획지침(Emergency Response Planning Guidelines, ERPGs), 미국환경보호청(The United States Environmental Protection Agency, USEPA)의 급성노출지침수준(Acute Exposure Guideline Levels, AEGLs), 미국에너지부(The US Department of Energy, DOE)에서 정하는 임시긴급노출기준(Temporary Emergency Exposure Limits, TEELs) 등이 있다.

ERPG는 화학물질 누출로 인한 작업자 및 지역사회 구성원을 대상으로 개발되었으며, 한 시간 동안 노출될 수 있는 한계 농도로써 약 170개의 화학물질이 ERPG-1, 2, 3단계로 제시되어 있다.<sup>1,3)</sup> AEGL은 화학물질 누출이나 재난으로 인한 일반 시민의 급성노출 예방지침으로, 노출시간을 10분, 30분, 1시간, 4시간, 8시간으로 구분하여 각 시간에 따른 농도를 AEGL-1, 2, 3 단계로 구분한다. 2018년 기준 188개 물질에 대한 최종보고서가 발표되었으며, 72개의 물질이 가안(Interim)으로 제시되고 있다.<sup>4)</sup> TEELs의 경우, 단시간 노출에 대한 우려농도 값으로 정의되며, 일반 인구집단을 대상으로 3,000개 이상의 화학물질이 TEEL-1, 2, 3단계로 구분되어 있다.<sup>3,4)</sup> 이상 언급한 세 종류의 급성 노출기준의 정의는 서로 유사하나, 일부 물질에 대해서는 등급별 노출기준 값들 큰 차이를 보이는 경우도 있다. 따라서 DOE에서는 이상 열거된 노출기준 중 상황에 따라 적절한 기준을 사용할 수 있도록 4,000여 종 이상의 화학물질에 대해 보호조치 기준(Protective Action Criteria, PAC)을 설정하여 각각 PAC-1, 2, 3으로 구분하여 제시하고 있다. PAC의 경우, 화학사고 발생 시 AEGL 값을 우선 적용하며, 해당 기준이 없을 때 ERPG, TEEL 순으로 적용하도록 하고 있다.<sup>3,4)</sup>

화학물질관리법(이하 화관법)에서는 화학물질 중 급성독성, 폭발성 등이 강해 화학사고의 발생 가능성이 높거나 화학사고 시 피해 규모가 클 것으로 우려되어 대비가 필요한 물질 97종을 사고대비물질로 지정하고 있는데(환경부 고시 제2017-107호), 사고 발생 시 필요에 따라 현장수습조정관을 파견하여 신속한 대응과 상황관리 및 수습 등의 역할을 수행토록 규정하고 있다.<sup>5)</sup> 이처럼 화학사고 수습, 대응 시 규모나 상황에 따라 활용 가능하도록 노출기준 제정비에 대한 논의가 필요한 시점이다. 특히, 현장 오염도 측정 결과를 바탕으로 초동 대응과 대피 후 복귀를 결정하게 되는데, 기준에 제시된 5개 노출 시간 간격의 AEGL 만으로 현장 오염도를 즉시 판단하는데 어려움을 겪고 있다. 지난 구미 불산 누출사고 당시에도 주민복귀시점이 성급하여 재 대피를 하는 등 혼란을 겪은 사례도 있어 급성노출기준 제정비에 대한 현장의 필요성이 꾸준히 제기되었다.<sup>6)</sup> 따라서 본 연구에서는 화학사고 후 현장대응의 어려움을 개선하고자 사고대비물질 중 폼알데하이드를 임의 선정하여 미국 EPA에서 제시하는 급성 노출기준(AEGL)을 기반으로 화학사고 후 노출시간 별 세분화된 기준을 제시하였다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 대상물질 선정

사고대비 물질 97종 중 독성, 물질 반응성 등 물질의 유해성과 노출기준 산정을 위한 독성자료 수집의 용이성, 국내에서 발생한 사고사례 등을 종합적으로 고려하여 폼알데하이드(유독물질, 제한물질로도 지정)를 우선 임의 선정하였다. 최근 5년(2015-2020)간 발생한 국내 화학사고 발생 건수 중 폼알데하이드와 관련된 사고는 총 16건으로 확인되고 있으며, 질산, 염산, 암모니아 등 물질과 함께 사고 다발물질로 집계되고 있다.<sup>7,8)</sup> 폼알데하이드는 단시간 노출 시 점막 부위 자극을 유발할 수 있으며, 장기간 노출 시 발암성(carcinogenicity)이 확인된 물질이다.<sup>9-11)</sup> 국제암연구소(International Agency for Research on Cancer, IARC)에서는 Group 1 발암물질로 지정하고 있으며, 고용노동부에서 제시하는 직업 노출기준도 이를 고려하여 하루 8시간 시간가중 평균 기준 0.5 ppm으로 관리되고 있다(Table 1).

**Table 1.** Basic information on regulatory status and exposure limits of formaldehyde

Classification		Contents
Regulatory list	Occupational Safety and Health Act (MOEL, KR)	- Chemicals requiring regulatory management - Chemicals requiring special management - Chemicals kept below permissible limits - Chemicals requiring workplace monitoring - Chemicals requiring special health diagnosis - Chemicals requiring submission of PSM report - Chemicals not allowed as trade secrets
	Chemical Substances Control Act (MOE, KR)	- Hazardous chemical substances - Restricted substances - Substances requiring preparation for accidents
Regulatory exposure limit	Occupational exposure limit	
	MOEL (KR)	TWA 0.5 ppm; STEL 1 ppm; Ceiling, N/A
	ACGIH (US)	TLV-TWA, 0.3 ppm; TLV-STEL, N/A; TLV-Ceiling, 0.3 ppm
	NIOSH (US)	REL-TWA 0.016 ppm; REL-STEL N/A; REL Ceiling 0.1 ppm (15 min)
	OSHA (US)	PEL TWA 0.75 ppm; PEL STEL 2 ppm; PEL Ceiling, N/A
Regulatory exposure limit	Emergency/Accidental exposure limit	
	AIHA (US)	ERPG-1, 1 ppm; ERPG-2, 10 ppm; ERPG-3, 40 ppm
	NIOSH (US)	IDLH, 20 ppm
	EPA (US)	- AEGL-1: 0.9 ppm (10, 30 min, 1, 4, 8 hours) - AEGL-2: 14 ppm (10, 30 min, 1, 4, 8 hours) - AEGL-3: 100 ppm (10 min), 70 ppm (30 min), 56 ppm (1 hour), 35 ppm (4, 8 hours)
	DOE (US)	PAC-1, 0.9 ppm; PAC-2, 14 ppm; PAC-3, 56 ppm
Hazard rating	MOEL (KR)	Group 1A (Carcinogen), Group 2 (Mutagen)
	ACGIH (US)	Group A2 (Carcinogen)
	CLP (EU)	Category 1B (Carcinogen)
	EPA (US)	Group B1 (Carcinogen)
	IARC (International)	Group 1 (Carcinogen)

Abbreviations: MOEL, Ministry of Employment and Labor; MOE, Ministry of Environment; KR, Korea; PSM, Process Safety Management; ACGIH, American Conference of Governmental Industrial Hygienists; US, United States; NIOSH, National Institute for Occupational Safety and Health; OSHA, Occupational Safety and Health Administration; TWA, time-weighted average; STEL, short-term exposure limit; TLV, Threshold Limit Value; N/A, not available; REL, Recommended Exposure Limit; PEL, Permissible Exposure Limit; ERPG, Emergency Response Planning Guidelines; IDLH, Immediately Dangerous to Life or Health; EPA, Environmental Protection Agency; AEGL, Acute Exposure Guideline Level; DOE, Department of Energy; PAC, Protective Action Criteria; CLP, Classification, Labelling and Packaging; EU, European Union; IARC, International Agency for Research on Cancer.

## 2. 급성노출기준 독성자료 선정

급성노출기준 산정을 위한 폼알데하이드의 독성 자료는 미국 EPA의 AEGL 보고서에 제시된 자료를 참고하였다(Table 2). AEGL-1 산정을 위한 독성 종 말점은 눈 자극(irritation)에 대한 최대무독성용량(No Observed Adverse Effect Level, NOAEL)을 적용하여, 22회의 임상시험에서 500여명 규모의 참여자를 대상으로 한 시험 결과를 적용하였다.<sup>10,12)</sup> AEGL-2

는 Sim & Pattle(1957)의 임상 연구에서 제시한 30 분 간의 노출 농도 13.8 ppm을 기반으로 한다. 이는 눈 자극으로 인해 약한 유루증(lacrimation)을 유발하는 농도 수준이며, 호흡기 노출에 의한 기도 저항이 증가하기 시작하는 역치점(threshold)이다.<sup>13)</sup> AEGL-3의 경우, 동물실험자료로부터 얻은 독성 자료를 이용하였으며, 실험용 쥐(rat)를 대상으로 4시간 동안 350 ppm의 농도(highest non-lethal value)에 노

**Table 2.** Experimental data for estimating each exposure level<sup>15)</sup>

Variable	AEGL			
	1	2	3	
Toxicity data	Endpoint	0.9 ppm	13.8 ppm	350 ppm
	Subject	over 500 people	12 healthy males	rat
	Exposure duration	6 minutes	30 minutes	4 hours
Time scaling		no data	no data	3
Uncertainty factor	Total	1	1	10
	Interspecies	no data	no data	3 (rodent)
	Intraspecies	1	1	3 (susceptible population)
Data adequacy		Over 22 clinical studies involving 500 subjects proved concentrations less than 1 ppm are non-irritating	Many of clinical studies involving over 500 subjects support the 14 ppm concentration as a reasonable value	Long-term and repeat-exposure studies support 4- and 8-hours values
Data evidence (Key study)		Bender et al. (1986) <sup>12)</sup>	Sim & Pattle (1957) <sup>13)</sup>	Nargony et al. (1979) <sup>14)</sup>

Abbreviations: AEGL, Acute Exposure Guideline Level; N/A, not available

\*The evidence for each AEGL was based on the key study, respectively.

출시된 결과에 안전계수(uncertainty factor, UF)를 적용하였다.<sup>14)</sup>

### 3. 급성노출기준 산정

급성노출기준 산정은 기본적으로 Haber가 제안한 독성학적 개념( $C \times t = k$ )을 보완한 함수 관계식을 적용하였다.<sup>16)</sup> 이 관계식은 유독가스의 노출 농도 (Concentration, C)와 시간(Time, t)에 따른 독성학적 효과(상수 k, constant)의 함수으로써, 특정 시간 동안 특정 농도의 유독가스에 노출된 경우 그 영향의 결과는 노출농도와 시간에 의해 결정된다는 이론이다. 노출에 의한 영향(k)은 노출농도와 시간의 관계에 의해 일정하게 유지되므로 상호적 관계가 유지되어야 하며, 영향 상수 k는 독성물질에 대한 양적·질적 반응을 반영하므로 노출농도와 시간 관계의 가중이 동등한 경우에만 유효하다. 노출 농도와 시간 가중이 동등하지 않을 경우 노출로 인한 영향이 과대 또는 과소 평가될 우려가 있어,<sup>16)</sup> 본고에서는 ten Berge 등(1986)이 제안한 노출 농도와 시간 관계의 특이 지수(n, exponent)를 고려하였다( $C^n \times t = k$ ).<sup>17)</sup> 즉, 상수 k 값은 노출에 의한 효과를 나타내는 값으로, 독성 종말점과 안전계수, 노출시간 및 특이 지수에 의해 결정되는데, 이를 이용하여 시간별 노출농도를 역추

정하였다. AEGL-3의 경우, 동물실험으로부터 얻은 독성 농도를 바탕으로 산정하였다. Nargony et al. (1979)의 동물실험 연구에서 제시한 350 ppm (실험용 쥐 대상 4시간 노출기준) 농도를 민감군(susceptible population) 보호를 위해 종내(interspecies) 민감도를 고려한 불확실계수 3과 종간(intraspecies) 민감도를 고려한 불확실계수를 3으로 하여 총 불확실계수 10을 적용하였다.<sup>14)</sup> 특이 지수 n 값은 화학물질의 특성에 따라 반치사농도(50% lethal concentration, LC50)에 대한 노출시간과 치사율의 이차함수 기울기 비(ratio)로 결정되는데, 단시간 노출인 점을 고려하여 기본값 3을 적용하였다.<sup>17,18)</sup> 이를 토대로 현재 미국 EPA에서 제시하고 있는 AEGL-1, 2, 3에 대한 5개 시간(10분, 30분, 1시간, 4시간, 8시간)별 노출 기준을 세분화하여 8시간 동안의 노출기준을 5분 간격으로 총 96개 구간을 제시하였다.

### III. 결 과

폼알데하이드의 급성노출기준 중 AEGL-1과 AEGL-2에 대한 기준치는 기존 임상연구에서 제시한 독성 종말점(endpoint)과 동일하였다. AEGL-1 값 산정에 적용된 정보들은 Bender et al.(1983)이 제시한 임상

연구 결과를 기반으로 하였으며,<sup>12)</sup> 일반 대기 중 공기과 0.9 ppm까지의 폼알데하이드 농도에 노출되었을 때 자극을 느끼지 못하거나, 가벼운 자극을 유발하는 수준이다. 따라서 총 8시간의 노출 기간 동안 시간경과와 관계없이 동일하게 0.9 ppm으로 제시하였다(Fig. 1). AEGL-2 값 산정에는 Sim & Pattle (1957)의 임상연구 결과에서 제시한 독성시험 결과를 적용하였다.<sup>13)</sup> 실험은 12명의 건강한 남성을 대상으로 13.8 ppm의 농도에 30분간 노출시킨 후 신체 반응 결과를 관찰하는 방식으로 이루어졌으며, 초기 노출로부터 약 10분 후 해당 농도에 대한 신체 적응(adaptation) 현상을 보였다. 따라서 이 결과를 바탕으로 8시간 전 노출기간 동안 14 ppm을 비상시 대응 가능한 농도로 제시하였다(Fig. 1).

AEGL-1과 2 기준치가 일정 시간 동안 특정 한계 농도에 노출된 인체 반응에 기반하여 제시된 반면, AEGL-3 산정을 위해 고려한 계수들을  $(350 \text{ ppm}/10)^3 \times 240 \text{ minutes} = k$  ( $C^n \times t = k$ ) 식에 적용하여  $(10,290,000 \text{ ppm}^3 \cdot \text{minutes} / \alpha \text{ minutes})^{1/3}$ 를 도출할 수 있는데, 노출 시간을 적용하여 최대 8시간까지 총 96개 구간의 AEGL-3값을 산정하였다(Fig. 1). 미국 EPA에서 5개 구간(10분, 30분, 1시간, 4시간, 8시간)에 대한 기준만을 제시한 반면, 산출식을 적용함으

로써 초기 노출 5분 기준으로 127 ppm의 AEGL-3 값을 산정하였으며, 15분 기준 88 ppm, 20분 80 ppm, 25분 74 ppm 등 세부 기준을 도출하였다(Fig. 1). 그러나 5분 노출시점부터 1시간 시점까지 127 ppm에서 56 ppm으로 1시간 이내의 초기 노출기간 동안 노출기준의 변화가 컸으며, 이후 4시간 시점(35 ppm)까지는 기준 농도 변화가 상대적으로 작았다. 8시간 노출기준 5분 간격으로 세분화한 AEGL-1, 2, 3값은 Table A1 (Appendix)에 제시하였다.

#### IV. 고 찰

화학물질의 누출이나 이로 인한 폭발, 화재 등 화학사고 발생 시 현장에서 즉시 적용 가능한 노출기준은 사고 대응을 위한 비상계획 수립은 물론 지역 사회 주민의 물질 노출로 인한 피해 예방활동을 위한 방향점이 될 수 있다. 서론에서도 언급했듯이 각 전문기관에서 화학사고로 인한 비상상황 발생 시 활용 가능한 노출기준을 제시하고 있으나, 본고에서는 미국 EPA에서 제시하고 있는 급성노출기준을 기반으로 시간 간격을 세분화하여 확대 제시하고자 하였다.

폼알데하이드에 대한 AEGL 값은 10분, 30분, 1시간, 4시간, 8시간 단위로 제시하고 있으나, 해당

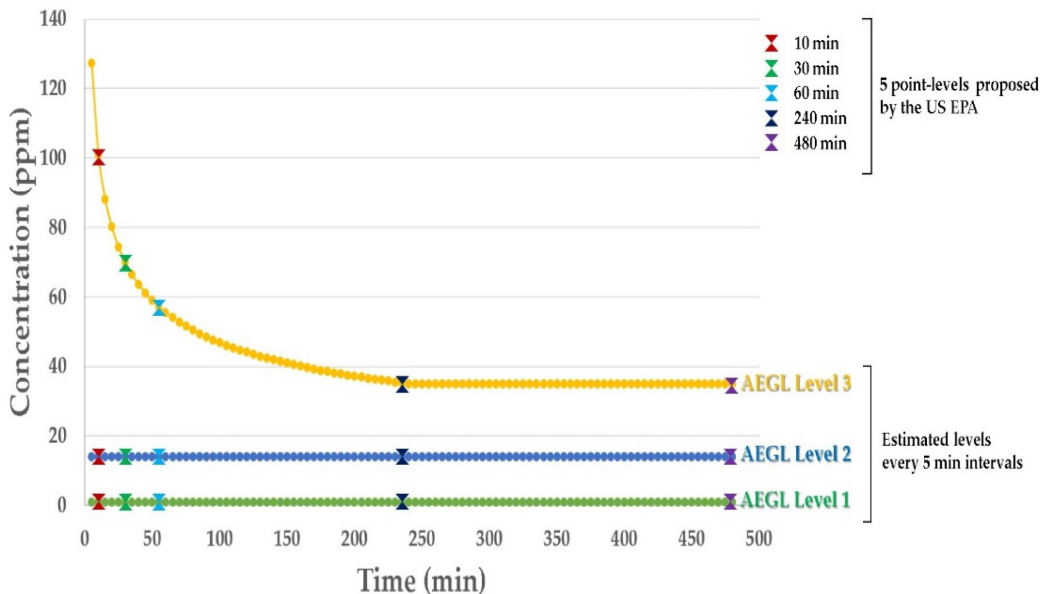


Fig. 1. Estimates of acute exposure guideline levels per every 5-minute for 8 hours

노출 시간 간격 사이 노출에 대한 세부적인 기준을 마련함으로써 화학사고 발생 시 사고 대응과 대피계획 수립의 구체화가 가능하다. 노출 시간을 5분 간격으로 산정한 결과에서 AEGL-1과 2에 해당하는 폼알데하이드 노출기준은 8시간 전 노출 기간 동안 일정하게 적용되었다. 이는 사람을 대상으로 수행한 임상결과를 바탕으로 정해진 기준 값으로, 일정 시간 이상 폼알데하이드에 노출되어도 인체에 영향을 주지 않는 역치값에 해당한다. AEGL-1은 실제 건강한 사람을 대상으로 수행한 임상연구 결과로부터 결정되었다. Bender et al.(1983)의 임상연구에서 0.1-1.0 ppm에 해당 하는 폼알데하이드를 6분 동안 노출시켰으나 신체 자극이 없거나 경미한 수준임을 확인하였다.<sup>12)</sup> 또한 다른 동물실험에서도 2-3 ppm 농도에 1회 노출 또는 반복 노출시켰을 때 호흡기 손상을 보이지 않았으며,<sup>19,22)</sup> 약 1.0 ppm 이하의 저농도에 노출될 경우 자극에 대해 적응(adaptation)현상이 나타남을 고려하여 전 노출기간(8시간) 동안 0.9 ppm으로 결정하였다. AEGL-2는 건강한 남성 12명에 대해 30분간 13.8 ppm의 폼알데하이드에 노출시킨 임상시험 결과를 바탕으로 기준을 결정하였다.<sup>13)</sup> 해당 농도에 대한 초기 노출 시간에 가벼운 점막 자극 현상이 나타났으나, 약 10분 경과 후 적응현상으로 인해 자극에 대한 체감이 저하되었다. 또한 Barnes & Speicher(1942)의 임상연구에서도 20 ppm의 농도에 단시간 노출될 경우, 대피 능력에 영향을 미칠 수 있음을 확인하였고, 14 ppm을 기도 저항을 증가시킬 수 있는 역치로 규정하였다.<sup>23)</sup> 따라서 유사시 대피능력과 호흡기 손상, 신체 적응현상 등을 종합적으로 고려하여 전 노출기간 동안 14 ppm을 AEGL-2 기준으로 결정하였다. AEGL-3은 생명에 위협을 주거나 사망에 이르는 수준으로 정의되고 있는 수준이므로 인간을 대상으로 하는 임상연구가 사실상 불가능하여 동물실험 결과를 외삽(extrapolation)하여 적용하였는데, 이 때 여러 안전계수들을 고려함에 있어 관련 자료가 불충분할 경우 보수적 접근이 필요하다. AEGL-3 값을 산출하기 위해 Haber의 공식을 적용할 때 노출 농도(LC50)와 시간, 특이 지수(n)가 중요한 변수로 작용한다. Haber가 제안한 공식( $C \times t = k$ )은 노출 농도와 시간 관계의 회귀식( $y = b_0 + b_1 \ln C + b_2 \ln t$ )으로부터 얻을 수 있는  $b_1$ 과  $b_2$ 의 값이 동등할 경우에만 적용이 가능하나,

대다수의 화학물질 흡입 노출 실험에서는 실제 적용이 어려운 단점이 있다.<sup>17,24)</sup> 노출에 의한 반응 치사율 결정을 위해서는 앞서 언급한 특이 지수 n 값이 결정적인 변수로 작용하게 되는데, 회귀식의  $b_1$ 과  $b_2$ 의 비(ratio)에 의해 결정된다( $n = b_1/b_2$ ). 따라서 n값은 정해진 기준이 아니라 수행하는 연구 결과로부터 얻을 수 있는 값( $b_1, b_2$ )의 변화에 따라 달라질 수 있다.<sup>17)</sup> AEGL-3 산정과정에서 지수 n값을 장시간 노출 시 적합한 1로 적용할 경우, 8시간 노출에 대한 AEGL-3값이 18 ppm으로 AEGL-2 값에 근접하게 되므로, 상대적으로 단시간 노출인 점을 고려하여 기본 값(default)인 3을 적용하였다.<sup>15,21)</sup>

화학사고 발생 시 적용 가능한 노출기준은 다양한 기관 또는 위원회에서 각각 달리 설정하여 제시하고 있으나, 궁극적인 개념은 유사하더라도 적용 대상에 대한 정의가 다르고, 또한 일부 물질에 대해서는 설정 값의 차이를 보이기도 한다.<sup>3)</sup> 따라서 어떤 상황에서 어떤 기준을 적용하여 관리할 것인지에 대한 결정이 선행될 필요가 있다. 예를 들어, 본고에서 다루고 있는 AEGL의 경우, 화학물질 누출 또는 재난 사고로부터 일반 시민의 노출을 관리하기 위한 기준으로, 특히 각 단계별 정의에서 민감인구를 포함하고 있다고 명시되어 있어 다른 노출기준과는 구별되는 특징을 가지고 있다. 반면, AIHA에서 제시하고 있는 ERPG는 근로자를 포함하여 화학물질 누출 또는 사고로부터 지역사회 대응을 위한 노출기준으로 하고 있으나, 그 대상을 일반 시민으로만 정의하고 있다. 또한 제정된 물질에 대한 노출 시간도 1시간을 기준으로 하고 있어 이보다 노출 시간이 짧거나 길 경우에 활용도가 AEGL에 비해 제한적일 수 있다.

한편, 어떤 물질에 대해 각 기관 또는 위원회에서 제시하는 노출기준이 상당한 차이를 보이는 경우가 있는데, 이는 현장 대응과 비상계획수립을 어렵게 하는 요인으로 작용할 수 있다. Öberg et al.(2010)은 ERPG와 AEGL 두 기준이 설정된 물질들을 대상으로 각 단계별(Tier-1, 2, 3) 차이를 비교하였는데,<sup>2)</sup> Tier-1 (ERPG-1 & AEGL-1)의 경우 아세트알데하이드를 포함한 15개 물질이 최대 166배 차이를 보였다. Tier-2 (ERPG-2 & AEGL-2)에 해당하는 물질의 노출기준도 17개 물질이 최대 26배 차이가 났으며, Tier-3 (ERPG-3 & AEGL-3)에 해당하는 13개 물질이 최대 15배 차이를 보였다. 이처럼 사고 물질

에 따라 각 노출기준별 차이를 보이는 물질은 계획 수립단계부터 각 사고 특성과 보호 대상을 고려하여 결정할 필요가 있다.

각 노출기준 설정에 있어 독성 종말점(endpoint)은 노출로 인한 건강영향과 직접 관련이 있기 때문에 우선적으로 고려되어야 한다. 즉, 흡입, 경구 등 어떤 노출 경로에 의한 독성자료를 적용할 것인지, 그리고 동물 실험을 이용했을 경우 인간에 적용하기 위한 안전계수는 어떻게 결정할 것인지 등 종합적 판단이 필요하다. Lee et al.(2018)은 ‘사고시나리오 선정에 관한 기술지침’에 따라 AEGL, ERPG, PAC 이 모두 설정된 31개 물질을 대상으로 독성 종말점(endpoint)과 급성독성 자료를 이용하여 우려농도 예측값을 산정하였다.<sup>25)</sup> 31개 물질 대부분 예측값이 유사하였으나, 각 기준별로 흡입독성자료를 이용했을 경우 최대 약 12배, 경구독성자료를 이용했을 경우 최대 48,000배 가량 차이를 보였다. 따라서 독성 종말점의 부재로 급성독성자료를 이용하여 농도 예측을 할 경우 자료 선택에 따라 화학사고 시 활용 가능한 노출기준이 크게 차이가 날 수 있으므로 신중한 접근이 필요하다.

## V. 결 론

사고대비물질 중 폼알데하이드를 선정하여 화학사고 대응과 지역사회 비상계획 수립을 위한 노출기준을 세분화하였다. 특히, 화학물질 누출이나 폭발·화재사고 발생 시 적용 가능한 여러 노출기준 중 미국 EPA에서 제시하는 단계별, 특정 노출시간 별 AEGL 기준을 기반으로 최대 8시간 노출 동안 5분 간격으로 산정하여 구체화하였다. 폼알데하이드의 AEGL-1과 2에 대한 기준 값은 사람을 대상으로 하는 임상연구와 동물실험에서 검증된 영향을 고려하여 전 노출시간 동안 일정하게 적용되었다. 그러나 AEGL-3의 경우 Haber가 제시한 개념과 동물 실험 결과 및 안전 계수를 적용하여 시간별 기준 농도를 산정하였는데, 5분 노출기준 127 ppm으로부터 최대 8시간 노출기준 35 ppm까지 총 96개 시간 간격의 세분화된 결과를 도출하였다. 따라서 본고에서 적용한 방법론을 활용하여 참고 독성자료가 확보될 경우, 폼알데하이드 외 다양한 유해화학물질에 대한 비상 시 노출기준의 세분화가 가능하며, 실제 사고

현장에서의 활용도 또한 높일 수 있을 것으로 기대된다.

## References

1. Lee H, Jeong T, Lee HJ, Jeong C, Ko JW. Apply AEGL for short time exposure using regression curve. *J Korean Instit Gas*. 2017; 21(5): 77-82.
2. Öberg M, Palmén N, Johanson G. Discrepancy among acute guideline levels for emergency response. *J Hazard Mater*. 2010; 184(1-3): 439-447.
3. Yoon C. Current state of regulatory chemical management Part 3-Chemical exposure limits in case of emergencies (releases, accidents). *Monthly Occup Health*. 2016: 22-31.
4. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Public Exposure Guidelines. Office of Response and Restoration. Available from: <https://response.restoration.noaa.gov/oil-and-chemical-spills/chemical-spills/resources/emergency-response-planning-guidelines-erpgs.html> [accessed 12 March 2021].
5. Ministry of Environment (MoE). Chemical Substances Control Act-Article 44 (Response at Scene of Chemical Accidents). Available from: [https://elaw.klri.re.kr/kor\\_service/lawView.do?hseq=51137&lang=ENG](https://elaw.klri.re.kr/kor_service/lawView.do?hseq=51137&lang=ENG) [accessed 12 March 2021].
6. Kim SY, Kim MS, Kim H, Kim B, Hwang SR, Kim K. Background survey on preparing for recovery criteria after chemical accidents (1). Research Report No. NICS-RP2016-2. National Institute of Chemical Safety; 2016. p. 1-33.
7. Chemical Substances Information System. Current status of chemical accidents and cases. Available from: <https://icis.me.go.kr/pageLink.do> [accessed 14 April 2021]. [In Korean].
8. Lee CS, Park J, Cho YS, Hwang SR, Cho E. A study on the methodology for risk assessment after chemical exposure and recommendation of acute exposure guideline level (1). Research Report No. NICS-RP2020-4, National Institute of Chemical Safety; 2020. p. 4-6.
9. Kim KH, Jahan SA, Lee JT. Exposure to formaldehyde and its potential human health hazards. *J Environ Sci Health C*. 2011; 29(4): 277-299.
10. United States Environmental Protection Agency (USEPA). Health and Environmental Effects Profile for Formaldehyde. EPA/600/X-85/362 (NTIS PB88174958). Available from: <https://cfpub.epa.gov/ncea/risk/recordisplay.cfm?deid=49092> [accessed 13 March 2021].
11. Wilbur SB, Harris MO, McClure PR, Spoo W. Tox-

- icological Profile for Formaldehyde. Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR)-United States Department of Public Health Service. Available from: <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp111.pdf> [accessed 13 March 2021].
12. Bender J, Mullin L, Graepel G, Wilson W. Eye irritation response of humans to formaldehyde. *Am Ind Hyg Assoc J.* 1983; 44(6): 463-465.
  13. Sim VM, Pattle RE. Effect of possible smog irritants on human subjects. *JAMA.* 1957; 165(15): 1908-1913.
  14. Nagorny P, Sudakova ZA, Schablenko S. On the general toxic and allergic action of formaldehyde. *Gig Tr Prof Zabol.* 1979; (1): 27-30.
  15. United States Environmental Protection Agency (USEPA). Interim Acute Exposure Guideline Levels (AEGLs) for Formaldehyde (CAS Reg. No. 50-00-0). NAC/Interim 1:07/2008. Available from: [https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-07/documents/formaldehyde\\_tsd\\_interim\\_07\\_2008.v1\\_0.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-07/documents/formaldehyde_tsd_interim_07_2008.v1_0.pdf) [accessed 13 March 2021].
  16. Miller FJ, Schlosser PM, Janszen DB. Haber's rule: a special case in a family of curves relating concentration and duration of exposure to a fixed level of response for a given endpoint. *Toxicology.* 2000; 149(1): 21-34.
  17. Ten Berge W, Zwart A, Appelman L. Concentration-time mortality response relationship of irritant and systemically acting vapours and gases. *J Hazard Mater.* 1986; 13(3): 301-309.
  18. National Research Council (NRC). Standing operating procedures for developing acute exposure guideline levels for hazardous chemicals. 1st ed. Washington, D.C.: National Academy of Science; 2001. p. 92-110.
  19. Maronpot RR, Montgomery Jr CA, Boorman GA, McConnell EE. National Toxicology Program nomenclature for hepatoproliferative lesions of rats. *Toxicol Pathol.* 1986; 14(2): 263-273.
  20. Morgan DO, Jarnagin K, Roth RA. Purification and characterization of the receptor for insulin-like growth factor I. *Biochemistry.* 1986; 25(19): 5560-5564.
  21. Rusch GM, Clary JJ, Rinehart WE, Bolte HF. A 26-week inhalation toxicity study with formaldehyde in the monkey, rat, and hamster. *Toxicol. Appl Pharmacol.* 1983; 68(3): 329-343.
  22. Woutersen R, Feron V. Inhalation toxicity of acetaldehyde in rats. IV. Progression and regression of nasal lesions after discontinuation of exposure. *Toxicology.* 1987; 47(3): 295-305.
  23. Barnes E, Speicher H. The determination of formaldehyde in air. *J Ind Hyg Toxicol.* 1942; 24(10): 10-17.
  24. Gaylor DW. The use of Haber's law in standard setting and risk assessment. *Toxicology.* 2000; 149(1): 17-19.
  25. Lee J, Kim S, Yang W, Yoon J, Ryu J, Kim J, et al. Investigation of the guidance levels for protecting populations from chemical exposure and the estimation of the level of concern using acute toxicity data. *J Environ Heal Sci.* 2018; 44(1): 44-54.

<저자 정보>

김은채(연구원), 조용성(연구관), 이청수(연구사), 양원호(교수), 황승울(과장), 박지훈(연구사)



## Appendix

**Table A1.** Estimated specific AEGLs with an interval of five minutes for 8 hours

Exposure time (min)	Classification			Note
	AEGL-1 (ppm)	AEGL-2 (ppm)	AEGL-3 (ppm)	
5	0.9	14	127	
10	0.9	14	100	EPA AEGLs (10 min)
15	0.9	14	88	
20	0.9	14	80	
25	0.9	14	74	
30	0.9	14	70	EPA AEGLs (30 min)
35	0.9	14	66	
40	0.9	14	64	
45	0.9	14	61	
50	0.9	14	59	
55	0.9	14	57	
60	0.9	14	56	EPA AEGLs (1 hour)
65	0.9	14	54	
70	0.9	14	53	
75	0.9	14	52	
80	0.9	14	50	
85	0.9	14	49	
90	0.9	14	49	
95	0.9	14	48	
100	0.9	14	47	
105	0.9	14	46	
110	0.9	14	45	
115	0.9	14	45	
120	0.9	14	44	
125	0.9	14	44	
130	0.9	14	43	
135	0.9	14	42	
140	0.9	14	42	
145	0.9	14	41	
150	0.9	14	41	
155	0.9	14	40	
160	0.9	14	40	
165	0.9	14	40	
170	0.9	14	39	
175	0.9	14	39	
180	0.9	14	39	
185	0.9	14	38	
190	0.9	14	38	
195	0.9	14	38	
200	0.9	14	37	
205	0.9	14	37	
210	0.9	14	37	
215	0.9	14	36	
220	0.9	14	36	
225	0.9	14	36	
230	0.9	14	36	
235-480	0.9	14	35	EPA AEGLs (4, 8 hours)