

직업적 노출 감시체계에 적용 가능한 노출조건범주 코드 개발

최상준^{1,2*} · 임대성³ · 김환철⁴ · 박주현⁵ · 고동희⁶ · 박동욱⁷ · 오수민¹ · 서희경⁸

¹가톨릭대학교 보건의료경영대학원, ²가톨릭보건의료경영연구소, ³원광디지털대학교 산업안전보건학과, ⁴인하대학교,
⁵동국대학교, ⁶연세대학교 세브란스병원, ⁷한국방송통신대학교, ⁸한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원

Development of Exposure Condition Category (ECOC) Codes Applicable to Occupational Exposure Surveillance Systems

Sangjun Choi^{1,2*} · Dae Sung Lim³ · Hwan-Cheol Kim⁴ · Ju-Hyun Park⁵ · Dong-Hee Koh⁶ ·
Donguk Park⁷ · Su Min Oh¹ · Hoekyeong Seo⁸

¹Graduate School of Public Health and Healthcare Management, The Catholic University of Korea

²Catholic Institute for Public Health and Healthcare Management

³Department of Industrial Safety and Health, Wonkwang Digital University

⁴Department of Occupational and Environmental Medicine, College of Medicine, Inha University

⁵Department of Statistics, Dongguk University

⁶Department of Occupational and Environmental Medicine, Severance Hospital, Yonsei University

⁷Department of Environmental Health, Korea National Open University

⁸Occupational Safety and Health Research Institute, Korea Occupational Safety and Health Agency

ABSTRACT

Objectives: The objective of this study was to develop a standardized exposure condition category (ECOC) coding system to facilitate the use of work environment measurement data in occupational exposure surveillance.


Methods: We reviewed the conceptual exposure assessment model and the Exposure Control Efficacy Library to identify key modifying factors (MFs) affecting workplace exposure levels, and used them to develop standardized ECOC codes. A pilot application was conducted with ten industrial hygienists who retrospectively evaluated 11,781 measurement records drawing upon their knowledge of site-specific exposure conditions.


Results: Based on three selected factors—source enclosure, local exhaust ventilation operation, and near-field work frequency—we defined twelve combinations that were later simplified into eight ECOC codes. Each ECOC was assigned a dimensionless MF score reflecting the relative exposure potential. Experts successfully classified nearly all records using the ECOC system, with high response rates across all categories. Among 2,918 detected chemical exposure records, the exposure index showed statistically significant differences across ECOC groups (ANOVA, $P<0.001$). ECOC8—representing the least controlled exposure conditions—was associated with the highest exposure index, while ECOC1—indicating highly controlled environments—had the lowest.


*Corresponding author: Sangjun Choi, Tel: 02-3147-8466, E-mail: junilane@gmail.com


Graduate School of Public Health and Healthcare Management, The Catholic University of Korea, 222 Banpo-daero, Seocho-gu, Seoul, 06591, Korea


Received: July 16, 2025 Revised: August 28, 2025, Accepted: September 1, 2025


 Sangjun Choi <http://orcid.org/0000-0001-8787-7216>


 Hwan-Cheol Kim <https://orcid.org/0000-0002-3635-1297>


 Dong-Hee Koh <http://orcid.org/0000-0002-2868-4411>

 Su Min Oh <https://orcid.org/0009-0002-1769-1998>

 Dae Sung Lim <http://orcid.org/0000-0003-4190-0390>

 Ju-Hyun Park <https://orcid.org/0000-0001-9675-6475>

 Dong-Uk Park <https://orcid.org/0000-0003-3847-7392>

 Hoekyeong Seo <https://orcid.org/0000-0002-8069-3788>

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.

Conclusions: The ECOC coding system effectively reflects workplace exposure variability based on key MFs. It provides a practical framework to supplement existing exposure databases with contextual information and can support more accurate exposure assessments, job-exposure matrix construction, and occupational disease prevention policies. Further validation across broader industry sectors is warranted.

Key words: Exposure surveillance, job-exposure matrix, modifying factor, exposure condition

I. 서 론

국가 안전보건 정책을 마련하고 직업병을 예방하기 위해 노출 감시체계(exposure surveillance system)를 구축하는 것은 필수적이며(Rantanen et al., 2001), 이를 위해서는 가용한 노출 데이터를 적절하게 표준화된 변수를 사용하여 분석하고, 객관적인 근거를 바탕으로 정책을 반영하는 것이 중요하다. 노출 감시체계 구축에 사용 가능한 대표적인 국내 데이터베이스는 산업안전보건법에 의해 전국 사업장을 대상으로 주기적인 모니터링을 하고 있는 작업환경측정 자료라고 할 수 있다. 사업주가 지정측정기관에 일정 비용을 지불하고 위탁하여 측정을 실시하는 형태로 측정제도가 운영되고 있기 때문에 측정결과의 신뢰도가 낮아 신뢰성을 제고하는 제도의 필요성도 제기되지만(Hwang, 2019), 2002년부터 각 기관의 자료들이 안전보건공단에 전산화되었고, 2010년부터 안전보건공단이 개발한 전산 시스템인 K2B(<https://k2b.kosha.or.kr/index.do>)를 통해 측정기관이 직접 결과를 보고하고 있어 국내에서 가장 방대한 정량적 노출평가 자료(Work Environment Measurement Database, WEMD)로 축적되어 오고 있어 활용가치는 크다고 할 수 있다.

Choi et al.(2019; 2023)은 WEMD의 노출관련 변수에 대한 표준화 연구를 시도해 왔고, 산업, 공정 표준 코드를 활용하여 납에 대한 WEMD를 이용하여 직무노출매트릭스(Job-Exposure Matrix, JEM)를 시범 구축한 바 있다(Park et al., 2022). 그러나, 노출 자료를 표준화된 산업, 공정별로 분석하여도 구체적인 노출 조건에 대한 정보가 없기때문에 농도 수준에 대한 해석이 어려운 한계가 있다. 이는 작업환경측정 제도에 의해 수집된 각 자료 변수가 산업안전보건법 시행규칙 제188조(작업환경측정 결과의 보고)에 의해 정해진 '서식 83'에 근거하고 있기 때문인데, 현재 보고 서식에는 부서, 공정, 단위작업장소 등 측정이 실시된 장소에 대한 정보는 있지만, 작업 조건 즉, 노출조건(exposure condition)

에 대한 보고 항목은 없다. 예를 들어 '용접' 공정에서 측정된 자료의 경우, 동일한 용접이라고 하더라도 국소 환기 시스템이 가동되는 곳과 환기가 잘 안되는 밀폐된 공간에서의 용접 흡 농도 노출 수준은 큰 차이가 있을 수 있다. 그러나 이러한 노출조건에 대한 정보를 알 수 없기 때문에 용접 공정 WEMD의 노출농도 변이 특성을 정확히 해석하기 어려운 제한점이 있다.

이에 본 연구에서는 국내 산업위생전문가들이 작업환경 측정에 활용 가능하도록 노출조건 범주(Exposure COndition Category, ECOC) 코드를 개발 하였다. ECOC 코드 개발을 위해 개념적 노출평가 모델(Conceptual Exposure assessment Model, CEM) 이론(Tielemans et al., 2008)과 노출 제어효율 라이브러리(Exposure Control Efficacy Library, ECEL)(Fransman et al., 2008)를 활용하였으며, 지정 측정기관에 소속된 10명의 산업위생전문가를 대상으로 ECOC 코드 적용 가능성도 평가하였다.

II. 연구방법

1. CEM 고찰을 통한 ECOC 코드 개발

정량적 노출수준을 판단하는 데 활용할 수 있는 ECOC 코드 개발을 위해, CEM(Tielemans et al., 2008)을 고찰 하였다. 해당 모델은 기존의 발생원(source) - 수용체(receptor) 모델(Smith et al., 1991)과 결정론적 노출 변화 요인(deterministic exposure modifiers)(Schneider et al., 1991; Woskie et al., 1995; Creely et al., 2005)에 기반한 기전적(mechanistic) 접근을 발전시킨 것으로, 작업장 내 실제 측정값과의 비교를 통해 일정 수준의 타당성이 검증된 바 있다(Cherrie & Schneider, 1999; Semple et al., 2001; Cherrie et al., 2004). 본 연구에서는 CEM에서 활용된 노출정도를 결정하는 구성 요소(component)와 각 구성요소의 세부 노출변화 요인(Modifying Factor, MF)을 고찰하여 ECOC 코드 개발에 적용하였다.

2. ECEL을 활용한 ECOC 코드별 노출변화 요인 점수 (MF score) 선정

본 연구에서는 ECOC 코드별 노출수준의 정량적 차이를 예측할 수 있는 MF 점수를 선정하였는데, MF 점수는 특정한 노출조건에 따라 변경되는 노출수준의 상대적 크기를 예측할 수 있는 단위가 없는 무차원 (dimensionless) 값이다. 예를 들어 국소환기 장치가 가동되지 않은 노출조건에서는 국소환기가 가동되는 조건보다 흡입 노출 수준이 더욱 높을 수 있는데, 이 상대적인 크기가 5배였다면 이 때 국소환기 장치가 가동된 경우의 MF 점수를 1로 할 경우, 가동되지 않은 경우의 MF 점수는 5라고 할 수 있다.

MF 점수 선정을 위해 Fransman et al. (2008)이 선행 연구에서 보고된 위험관리 방법(risk management measure, RMM)에 따른 노출 저감 효율에 대한 데이터들을 수집하여 구축한 ECEL 데이터베이스를 활용하였다(Fransman et al., 2008). ECEL에는 특정 제어조치가 수행되기 전, 후의 노출농도 변화를 확인하여 노출 저감 효율(reduction efficacy, RE %)이 제시된다. 예를 들어, 발생원에 대한 격리 조치를 하기 전 노출농도가 10 mg/m³에서 격리 조치 후 1 mg/m³로 감소한 경우, 노출 저감 효율은 $90\% \left(\frac{10\text{mg/m}^3 - 1\text{mg/m}^3}{10\text{mg/m}^3} \right) \times 100$ 로 계산되며, 이는 반대로 해당 제어 조치가 없을 경우 최대 10배 높은 노출 수준이 가능함을 의미한다. 즉 노출제어 조건에 따른 MF 점수가 10배 차이가 난다고 할 수 있다.

본 연구에서는 ECOC 코드별 특정 제어조치가 적용된 노출조건(with Control *i*)의 MF 점수를 기본 값 '1'로 정하고, 특정 제어조치 *i*가 적용되지 않은 경우(without Control *i*) MF 점수는 식 (1)과 같이 ECEL의 노출 저감 효율값(RE, %)을 이용하여 계산하였다.

$$\text{MF score (without Control } i) = \text{MF score (without Control } i = 1) \times \left(\frac{100}{100 - \text{RE}(\%)} \right) \quad \text{식 (1)}$$

- MF: Modifying factor
- RE: reduction efficacy, %

만약 국소환기 장치 가동에 따른 RE(%)가 80%였다면 국소환기 가동 장치가 없는 노출조건에서의 MF 점수는 식 (1)에 의해 5가 되며 이는 국소환기 장치 가동했을 때보다 가동하지 않을 경우 노출수준이 5배 높아질 수 있다는 의미로 해석할 수 있다.

3. ECOC 코드 시범 적용

1) 시범평가 대상 전문가

본 연구에서 개발한 ECOC 코드를 작업환경측정기관의 산업위생전문가들이 활용 가능한지 평가하기 위해 2024년 9월에 자발적으로 참여한 수도권에 소재한 2개 지정 측정기관을 대상으로 소속된 10명의 산업위생전문가를 모집하였다.

연구에 참여한 전문가들에게 ECOC 코드 개발 내용에 대해 설명해 주고, ECOC 코드를 노출조건에 대한

Table 1. Summary of workplaces and measurement counts evaluated by exposure condition

Institute	Expert	Career, years	Workplaces		Measurements	
			N	%	N	%
A	Expert 1	15	17	8	584	5
	Expert 2	3	31	15	619	5
	Expert 3	8	8	4	473	4
	Expert 4	8	11	5	167	1
	Expert 5	3	53	25	957	8
B	Expert 6	8	35	17	2,935	25
	Expert 7	6	17	8	1,226	10
	Expert 8	1	20	10	890	8
	Expert 9	5	13	6	1,060	9
	Expert 10	32	4	2	2,870	24
Total			209	100	11,781	100

문항으로 만들어 각자 직접 측정된 사업장의 측정결과에 대해 측정당시 조건을 고려하여 응답하도록 하였다. 예를 들어, '측정당시 국소환기 장치가 가동되고 있었습니까?'의 질문에 대해 '예/아니오/잘 모르겠음' 중 하나로 답하도록 하였다. 측정당시 노출조건에 대한 기억오류(memory bias)를 최소화 하기 위해 가장 최근 6개월 이내에 측정을 실시한 사업장(2024년 상반기 측정대상)에 대해서만 응답하도록 하였다. 노출조건에 대한 기억이 나지 않거나 판단이 되지 않을 경우 '잘 모르겠음'으로 평가하도록 하였고, 평가참여 동기와 정확도를 높이기 위해 참여자들에게 소정의 자문료(15만원/시간)를 지급하였다.

평가에 참여한 전문가의 산업위생 경력은 1년부터 32년까지 다양했으며, 경력 7년 이하의 Junior 그룹이 5명, 7년 초과 Senior 그룹이 5명이었다. 각 전문가별 경력 및 평가 대상 측정 사업장 및 자료 수 현황은 Table 1에 요약하였다.

2) 시범평가 대상 자료

시범평가 대상 자료는 총 209개 사업장으로부터 2024년 상반기에 실시된 11,781개 측정결과이며, 제조업이 9,168개 자료로 가장 많았고, 다음으로 운수 및 창고업(598개), 보건업 및 사회복지 서비스업(524개), 전문, 과학 및 기술 서비스업(436개) 순이었다. 유해인자 종류별 분포를 보면 물리적 인자 3종과 화학적 인자 170종에 대해 측정되었으며, 유기화합물(5,867개)이 가장 많았고 다음으로 금속류(1,765개), 산 및 알칼리류(1,338개), 소음(1,217개), 분진(844개) 순이었다.

4. 통계분석

시범 평가에 활용한 11,781개 자료의 노출 수준을 전문가들이 평가한 ECOC 그룹에 따라 어떻게 차이가 나는지 비교하였다. 서로 다른 측정농도 단위(mg/m³, ppm) 등을 갖고 있는 다양한 유해인자들의 자료이기 때문에 측정 농도를 노출기준으로 나누어 노출지수(exposure index, EI)로 표준화한 값을 노출수준으로 이용하였고, ECOC 그룹에 따른 노출지수의 평균과 95백분위수를 그래프로 비교하였다. 소음의 경우 노출시간을 측정된 음압수준(dB)에 대한 허용노출시간(permissible exposure time, PT)으로 나누어 노출지수를 계산하였으며, 허용노출시간은 아래 식 (2)와 같이 계산하였다.

$$PT = CT \times 2^{[(CL-SL)/ER]} = 8 \times 2^{[(90-SL)/5]} \quad \text{식 (2)}$$

- PT: Permissible exposure time,
- CT: Criterion time (permissible exposure time for the criterion level: 8 hour),
- CL: Criterion level (8-hour permissible exposure limit for noise: 90 dBA),
- SL: Measured sound level (dBA),
- ER: Exchange rate (5 dBA)

흡입노출 대상 화학적 유해인자에 대한 자료 중 측정값이 검출된 2,918개 자료를 대상으로 각 ECOC 그룹 간 평균 차이를 검정하기 위해 일원배치 분산분석(One-way ANOVA)을 실시하였으며, 그룹 간 등분산성이 충족되지 않는 것으로 나타나 Games-Howell 사후검정(Pairwise Games-Howell test)을 이용하여 그룹 간 유의한 차이를 추가로 검토하였다. 다중 비교로 인한 제1종 오류를 보정하기 위해 Bonferroni 보정(Bonferroni adjustment)을 적용하고, 유의수준은 $p < 0.05$ 로 설정하였다. 화학적 유해인자의 노출농도 분포가 대수정규분포로 알려져 있기 때문에 로그 변환 [ln(노출지수)] 후 분석을 수행하였고, 통계분석은 Jamovi version 2.6(The Jamovi Project, 2024)을 이용하여 수행하였다.

III. 결 과

1. CEM 분석 및 노출변화 요인(MF) 조사

CEM은 발생원(source)으로부터 노출대상 작업자(receptor)에게 이동할 수 있는 구획(compartment), 그리고 최종 노출대상 작업자(receptor)의 세가지 요소들의 관계로부터 노출평가의 메커니즘을 설명하고 있으며, 유해물질의 이동을 위한 네 가지 메커니즘이 포함된다: (i) 기체나 증기 분자 또는 고체 입자가 원재료에서 분리되는 과정(발생 강도), (ii) 오염 물질이 구획으로 이동하거나 구획 간 이동하는 과정, (iii) 구획에서 오염 물질이 국소 환기나 청소 등의 처리 과정으로 인해 제거되는 과정, (iv) 수용자에 의한 최종 노출 과정이다.

CEM에서는 모델의 구성 요소를 8개로 세분하고, 총 9개의 노출수준에 영향을 주는 노출변화 요인(MF)으로 구분하였는데, 이 9개의 MF 중 본 연구에서 개발하고자 하는 노출조건과 관련이 큰 부분은 발생원으로부터 노

Table 2. Components of the conceptual exposure assessment model, modifying factors, and inclusion in exposure condition category (ECOC) code development

Component	Modifying factor	Description	Included factors for ECOC code development
Source	Activity emission potential (H)	Describes the potential of the activity to generate exposure; determined by the following characteristics: type and amount of energy transfer, scale (e.g. amount product used), and product-to-air interface (e.g. level of containment)	
	Substance emission potential (E)	Determines the intrinsic emission potential of a substance, i.e. dustiness for particulate agents and volatility for liquids	
LCIR*	Localized control (LC)	Control measures in proximity of the source intended to remove emissions, e.g. local exhaust ventilation, airborne capture sprays	✓
Source enclosure	Segregation (Seg)	Isolation of sources from the work environment without containment of the source itself, e.g. separate drying room	✓
NF** and FF [†] zone	Dilution (D)	Natural and mechanical ventilation characteristics, determining the dilution of air contaminants through the room, i.e. between NF-FF zone and FF outside	✓
NF zone	Personal behavior (P)	Orientation and distance of the worker to the source in the NF, determining the potential exposure, e.g. worker positioned at very close distance during precision work, overhead work	✓
Personal enclosure	Separation (Sep)	Providing a worker with a personal enclosure within a work environment, e.g. air-conditioned cabin	✓
Surfaces	Surface contamination (Su)	Emission related to release of deposited contaminants on surrounding surfaces (including worker clothing) due to natural means or general workplace activities (e.g. moving equipment/vehicles)	
Receptor	Respiratory protective equipment (RPE)	Efficiency of RPE preventing the inhalation of airborne substances (not addressed in this paper)	

*LCIR: Local control influence region, **NF: Near field, [†]FF: Far field

출대상 작업자에게 까지 유해요인이 전달되는 과정에서 노출 수준에 영향을 줄 수 있는 5개 요소이다. 모델의 구성 요소와 MF에 대한 요약 및 ECOC 코드 개발에 고려한 MF를 Table 2에 요약하였다.

1) 발생원과 작업자의 밀폐(Source/Personal enclosure)
발생원이 작업장 내에 별도의 밀폐된 구역에 격리되어 위치해 있는 경우, 이를 발생원 밀폐구역(source enclosure)이라고 할 수 있다. 또한 작업자의 측면에서는 작업자들이 작업장 내 별도의 사무실 혹은 중앙통제실과 같은 구역에서 주로 모니터링하며 원격 조정하는 업무를 하는 경우 이를 개인 밀폐구역(personal enclosure)이라고 할 수 있다. 발생원 혹은 개인 밀폐구역 모두 작업자의 노출 관점에서는 노출 수준 감소에 매우 큰 영향을 주

는 변수라고 할 수 있다.

2) 국소제어 영향 구역(Local Control Influence Region, LCIR)

발생원에서 발생한 유해물질이 최종 노출대상 작업자에게 이동되는 과정에서 유해물질을 제어 하는 영향 구역이 설정될 수 있으며, 모델에서는 이 구역을 LCIR이라고 정의하였다. 이 구역은 발생원 주변에 설치된 물리적인 이동 차단 설비(예: 차단막, 습식 분무설비를 통한 먼지 제거 등), 국소환기 시스템의 가동 수준(예: 후드 유형, 제어 구역의 범위, 제어속도 등)에 따라 결정될 수 있으며, 정확한 물리적 경계로 구분하기는 어렵고, 발생원 주변에 여러 LCIR이 형성될 수 있고, 이는 작업자의 노출 가능성을 줄이는 역할을 하게 된다.

3) 근거리(Near Field, NF)/원거리(Far Field, FF) 구획
 근거리(NF) 구획은 작업자의 호흡기로부터 어느 방향 이든 1미터 이내의 공기 부피로 정의하고 있다. 원거리(FF)는 작업자의 호흡기로부터 1미터 밖의 작업장 나머지 전체 부분을 의미한다. 따라서 NF-FF의 개념은 상자 안에 상자가 있는 것과 유사하게, 작업자가 FF 구역 내에서 움직이면서 NF 구역이 둘러싸고 있는 형태로 볼 수 있다. 노출의 관점에서는 작업자의 NF-FF 구획내에 유해물질 농도가 높을수록 노출 가능성도 높아지고, 특히 NF 구획 내의 오염도가 매우 중요하다. 따라서 작업자의 NF 구획 내에 발생원이 존재할 때 노출강도는 높아지며 매우 중요한 변수라고 할 수 있다.

2. ECOC 코드 개발

1) 노출조건 범주

CEM 구성요소와 MF를 검토한 결과 Table 3과 같이 작업자 노출 수준에 가장 크게 영향을 줄 것으로 판단되는 세가지 구성요소(발생원, 국소제어, 근거리 노출빈도)와 각 요소별 2개, 2개, 3개의 MF를 노출조건 범주로 선정하였다. 각 구성요소별 MF의 판단 기준은 다음과 같다.

첫째, 발생원에 대한 MF는 발생원과 작업자가 물리적으로 격리되어 있는가를 판단기준으로 하였다. 이는 작업

자의 화학적 유해인자 노출에 가장 큰 영향을 주는 요인 중 하나이며, CEM에서 발생원/수용체의 격리 혹은 분리된 상태를 모두 포함한다. 발생원 공정 혹은 장치, 설비 등이 작업장 내에서 별도로 분리되고 밀폐된 공간에 있거나, 작업자가 중앙통제실과 같은 발생원과 분리된 공간에서 주로 상주하며 작업하는 경우 모두 ‘발생원이 밀폐/격리된 경우(enclosure or isolation)’로 결정할 수 있다. 여기에 해당되지 않는 모든 경우, 즉 발생원과 작업자가 작업장 내에 함께 공존하며 작업하는 경우는 ‘발생원이 밀폐/격리되지 않은 경우(non-enclosure)’로 판단한다.

두 번째 요소는 발생원에서 발생한 유해인자에 대한 국소 제어(local control) 조건이다. 즉 국소환기 시스템이 가동되는가를 기준으로 ‘가동되는 경우’와 ‘국소환기 시스템이 없거나 가동되지 않는 경우’로 노출조건을 구분하였다.

세 번째 요소는 작업자가 발생원으로부터 근접해서 작업하는 빈도이다. 이는 개념적 노출모델에서 고려했던 근거리(NF) 작업의 정도를 ‘작업자로부터 1미터 이내에 발생원이 존재하며 작업하는 빈도’로 정의하고, 전체 작업시간 중 ‘1시간 이내의 간헐적(intermittent)’인 경우와 ‘1시간-4시간 정도의 부분 작업시간(half shift)’, 그리고 ‘전체 작업시간 대부분(full shift)’인 세 가지 노출 조건으로 분류하였다.

Table 3. Components, determinants and modifying factors for exposure condition category (ECOC) classification

Component	Determinant	Modifying factor	Description	Score
Source	Isolation of the worker from the source	Enclosure or isolation	The worker and the source are not in the same space but are physically separated (e.g., the worker operates remotely in a control room).	1
		Non-enclosure	The worker and source are in the same space.	10
Local control	LEV* status	LEV in operation	Ventilation equipment is in operation for local control of hazardous factors produced from the source.	1
		LEV absent or not operating	Ventilation equipment for local control of hazardous factors produced from the source is either absent or not in operation.	5
Near-field exposure	Frequency of working close to the source	Intermittent (<1 hour)	The worker spends less than 1 hour of their total work time within 1 meter of the source.	1
		Half-shift (1-4 hour)	The worker spends 1-4 hours of their total work time within 1 meter of the source.	5
		Full-shift (≥4 hour)	The worker spends most (≥4 hours) of their total work time within 1 meter of the source.	10

*LEV: Local exhaust ventilation

Table 4. Classification of exposure condition category (ECOC) codes by modifying factor combinations

Source	Local control	Near-field work	Final score*	ECOC code
Enclosure	LEV** in operation	Intermittent	1	ECOC1
		Half-shift	5	ECOC2a
		Full-shift	10	ECOC3a
	LEV absent or not operating	Intermittent	5	ECOC2b
		Half-shift	25	ECOC4
		Full-shift	50	ECOC5a
Non-enclosure	LEV in operation	Intermittent	10	ECOC3b
		Half-shift	50	ECOC5b
		Full-shift	100	ECOC6
	LEV absent or not operating	Intermittent	50	ECOC5c
		Half-shift	250	ECOC7
		Full-shift	500	ECOC8

*Final score was derived by multiplying the scores of the constituent modifying factors

**LEV: Local exhaust ventilation

최종 노출조건 범주(ECOC)는 Table 4와 같이 세 가지 요소의 각 MF들의 조합($2 \times 2 \times 3 = 12$)인 12개의 코드로 분류할 수 있으며, 각 MF별 점수의 곱으로 각 ECOC 코드의 MF 총점이 계산되었다. 이 MF 총점이 높은 순서에 따라 ECOC 코드 번호도 커지도록 부여하였고, 같은 MF 점수의 경우 동일한 번호에 영문 소문자로 구분(예: ECOC2a, ECOC2b)하였다. 따라서 ECOC1은 발생원과 작업자가 격리되고 국소환기 장치가 가동되면서, 발생원으로부터 1 m 이내에서 작업하는 빈도가 간헐적이어서

매우 노출제어가 높은 조건을 나타내며 작업자의 노출수준은 가장 낮을 것으로 기대할 수 있다. 반면에 ECOC8은 발생원과 작업자가 격리되어 있지 않고 국소환기 장치가 없거나 가동되지 않는 상황에서 작업자는 발생원으로부터 가까운 곳에서 대부분의 작업시간을 보내는 최악의 노출 조건이라고 할 수 있다.

2) 노출변화 요인 점수(MF score)

Table 3의 각 노출조건별 MF 점수는 ECEL(Fransman

Table 5. Estimated average reduction efficacy values and modifying factor (MF) scores by exposure control method

Control measure	Exposure control efficacy library*		MF score without control (95% confidence interval)**
	N	Estimated reduction efficacy (95% confidence interval), %	
Enclosure	14	50 (4 to 74)	2.0 (1 to 3.8)
Complete	3	86 (30 to 97)	7.1 (1.4 to 33.3)
Partial	6	23 (-103 to 70)	1.3 (0.5 to 3.3)
LEV†	280	82 (78 to 84)	5.6 (4.5 to 6.3)
Exterior	65	81 (75 to 86)	5.3 (4.0 to 7.1)
LEV + enclosure	9	86 (69 to 94)	7.1 (3.2 to 16.7)
Separation of workers	14	87 (71 to 94)	7.7 (3.4 to 16.7)
Complete	9	90 (75 to 96)	10.0 (4.0 to 25.0)
Partial	5	71 (-31 to 94)	3.4 (0.8 to 16.7)

*Library data sourced from Fransman et al. (2008)

**Modifying factor score was calculated using equation (1) described in method section

†LEV: Local exhaust ventilation

et al., 2008)에서 제시된 노출제어 방법에 따른 저감 효율값을 이용하여 식 (1)을 이용하여 변환된 MF 점수를 참고로 하여 결정하였다. 본 연구에서 개발한 ECOC 코드의 노출조건 범주와 유사한 ECEL의 평균 저감효율 예측값과 95% 신뢰구간, 변환된 MF 점수는 Table 5와 같았다. ECEL에서 보고된 평균 저감 효율은 완전 밀폐의 경우 86% (발생원이 밀폐되지 않았을 때 MF score = 7.1), 국소환기의 경우 82% (국소환기가 없을 경우 MF score = 5.3), 작업자가 완전히 발생원으로부터 분리된 경우 90% (발생원으로부터 근거리 작업이 대부분인 경우 MF score = 10), 부분 분리된 경우 71% (발생원으로부터 근거리 작업이 부분적으로 있는 경우 MF score = 3.4)였다. ECEL의 각 노출제어 방법에 따른 저감 효율 자료의 변이(95% 신뢰구간)를 고려하여, ECOC에 따른 MF 점수를 1, 5, 10으로 단순화하였다. 이는 제어조건이 없을 경우를 1로 했을 때 발생원 격리상태와 근거리 작업빈도에 따라 최대 10배까지 노출수준이 높아질 수 있고, 국소환기에 의한 제어 조건이 없는 경우 최대 5배 노출수준이 높아질 수 있음을 의미한다.

3. ECOC 코드 시범 적용 평가

지정측정기관에서 직접 작업환경측정을 실시하고 있는 산업위생 전문가 10명을 대상으로 ECOC에 대한 각 요소별 평가 결과 11,781건의 측정결과에 대해 84건을 제외하고 모두 노출조건에 대한 평가가 가능하였다. 각 항목별 평가결과는 Table 6과 같다. 발생원과 작업자의 격리 유무의 경우 '잘 모르겠음'으로 판단이 어려웠던 경우는 8건

이었고, 국소환기장치 가동 유무에 대해 판단하지 못한 건수는 78건이었으며 모두 경력이 7년 이하인 Junior 그룹이었다. 발생원 근처에서 작업하는 빈도에 대한 항목에서는 미 판단 건수 없이 모두 평가되었다.

개인측정 자료에 대한 노출지수의 산술평균과 95백분위수를 전문가들이 평가한 노출조건 범주별 비교한 결과 Figure 1과 같이 모두 발생원과 작업자 격리가 되지 않고, 국소환기도 가동되지 않고 발생원 근거리 작업빈도가 전 작업시간인 경우에 노출지수가 가장 높게 나타났다. 반면, 발생원과 작업자가 격리가 되고 국소환기가 가동되는 조건에서 노출지수가 가장 낮은 분포를 나타내었다. 또한 세 가지 범주 조합된 그룹내에서 발생원 근거리 작업 빈도가 간헐적인 경우에 비해 빈도가 늘어날수록 노출지수가 증가하는 경향을 보였다.

화학적 유해인자에 대해 측정결과 검출된 자료에 대해 노출조건 범주별 노출지수 분포에 대해 ANOVA 분석 결과 Figure 2와 같이 평균 노출지수는 ECOC1이 가장 낮고, ECOC8이 가장 높았으며, ECOC 그룹별 유의한 차이를 보였다($P < 0.001$).

IV. 고 찰

본 연구에서는 개념적 노출평가 모델(CEM)과 노출제어 효율 라이브러리(ECEL)를 기반으로 작업환경 노출평가 시 적용 가능한 노출조건범주(ECOC) 코드를 개발하고, 이를 국내 산업위생전문가의 시범 평가를 통해 실제 적용 가능성을 검토하였다. ECOC 코드는 발생원 격리

Table 6. Summary of expert responses on exposure condition categories

Exposure condition categories	Response item	Junior (n=5, ≤ 7 years)	Senior (n=5, > 7 years)	Total	%
Was the worker isolated from the source?	Yes	1,643	740	2,383	20.2
	No	3,101	6,289	9,390	79.7
	Not sure	8	0	8	0.1
Was local exhaust ventilation equipment in operation?	Yes	2,712	1,436	4,148	35.2
	No	1,962	5,593	7,555	64.1
	Not sure	78	0	78	0.7
How often was the worker working within 1 meter of the source?	Intermittent (<1 hr)	527	992	1,519	12.9
	Partial (1- 4 hr)	1,635	4,602	6,237	52.9
	Full-time work (≥4 hr)	2,590	1,435	4,025	34.2
Total		4,752	7,029	11,781	100.0

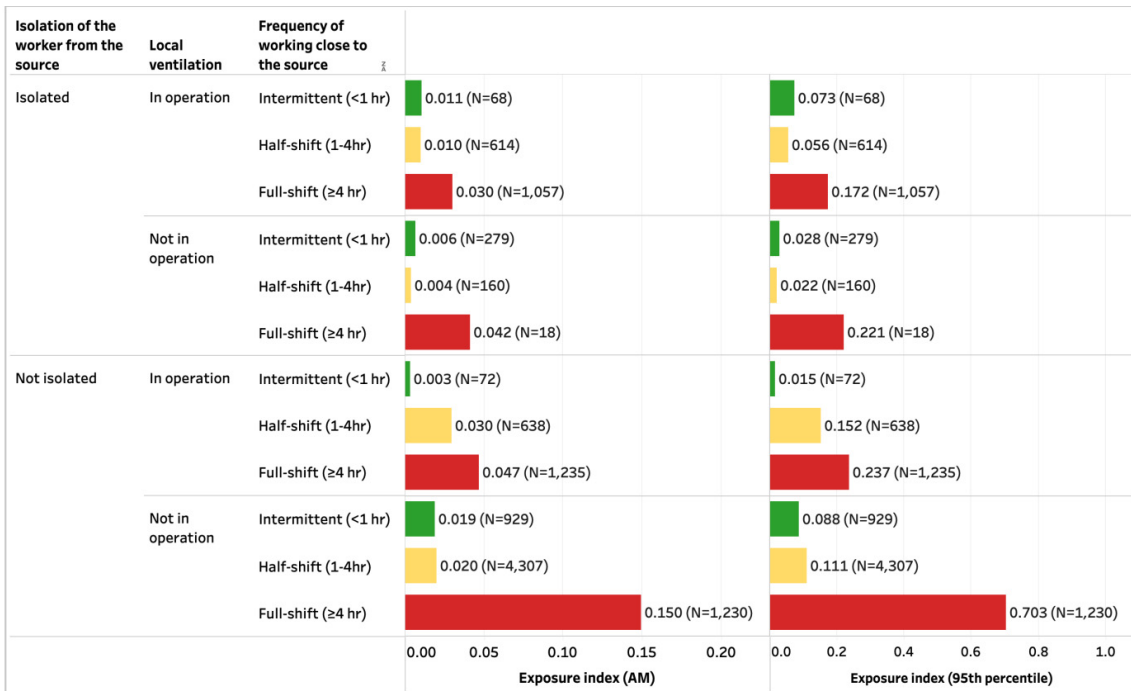


Figure 1. Comparison of the arithmetic mean (AM) exposure index (measured value divided by the exposure limit) and the 95th percentiles between exposure condition categories using personal sampling results.

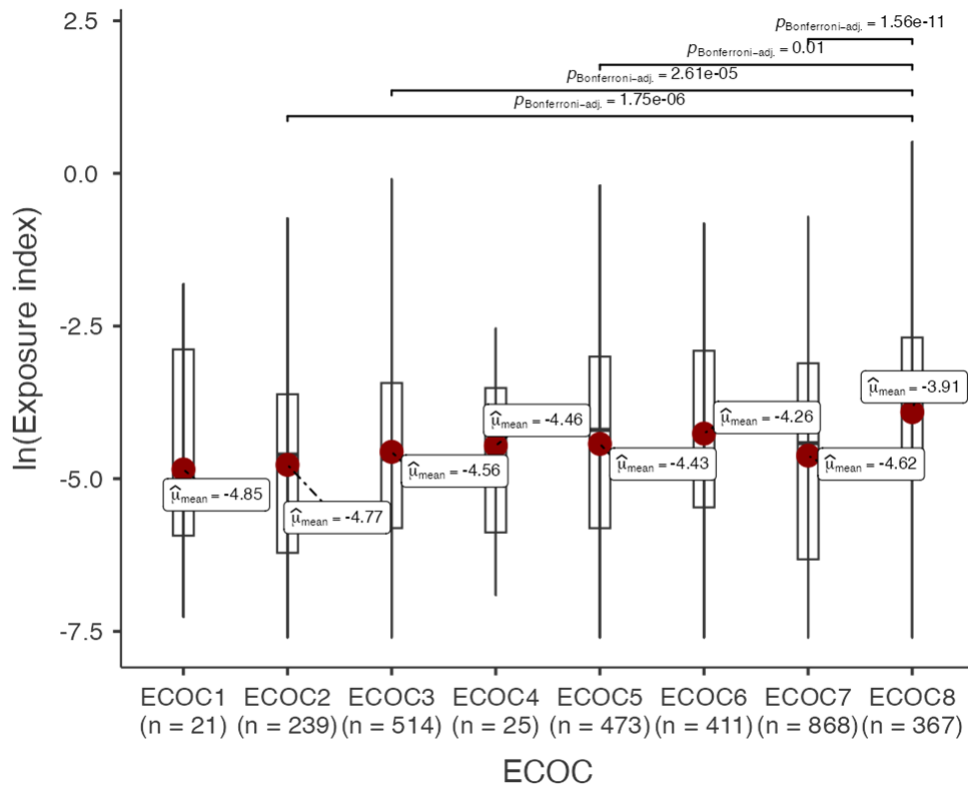


Figure 2. Comparison of exposure index (measured value divided by the exposure limit) distributions of chemical agents by exposure condition category (ECOC) codes, based on detected data (n=2,918, ANOVA $P < 0.001$).

여부, 국소환기장치 가동 여부, 근거리 작업 빈도의 세 가지 주요 MF를 기반으로 총 12개 그룹으로 구분되었으며, 각 조건의 조합에 따라 작업자의 상대적 노출 가능성을 정량적으로 예측 할 수 있도록 MF 점수를 부여하였다. 이러한 접근은 기존 WEMD 자료에서 확인 할 수 없었던 노출조건 정보를 보완하여, 다양한 산업 및 공정에서의 노출수준 해석에 있어 보다 정밀한 비교를 가능하게 한다는 점에서 의의가 있다.

MF 점수는 각각의 노출조건이 제어 되었을 때 노출 수준에 영향을 줄 수 있는 잠재적 크기를 의미하는데 이를 정확하게 예측하기 위해서는 다른 모든 조건이 통제된 상태에서 특정 노출조건에 대한 노출량 평가 자료를 기반으로 상대적 크기를 계산해야 한다. 예를 들어, 동일한 사업장의 현장을 대상으로 발생원의 격리, 작업량 등 다른 변수는 동일하고 국소환기 설비의 가동 전, 후의 조건에서 노출 수준을 평가하였다면 국소환기 설비 가동 조건에 대한 MF 점수를 정확히 계산해 낼 수 있을 것이다. 본 연구에서는 국내에서 노출조건에 따른 노출수준을 비교한 자료를 찾기 어려웠으며, Fransman et al.(2008)이 수행한 노출저감 효율 라이브러리 데이터를 활용하였다. 이 연구의 자료도 다양한 현장 자료를 수집하여 각 노출조건에 따른 저감 효율을 예측한 것이기 때문에 Table 5와 같이 평균 예측값과 함께 95% 신뢰구간을 제시하고 있고, 노출조건 마다 변이가 있음을 알 수 있다. 이에 본 연구에서는 평균 예측값과 변이를 고려하여 1, 5, 10과 같은 정수배의 MF 점수를 할당하였다. 그러나 시범 평가를 통해 12개의 노출조건 조합에 따른 노출지수를 비교했을 때 Figure 1과 같이 ECOC1(발생원 격리 + 국소환기 가동 + 발생원 근처에서 작업 빈도는 간헐적인 경우)의 노출지수가 낮고 ECOC8(발생원 격리되지 않음 + 국소환기 미가동 + 발생원 근처에서 주로 작업)의 노출지수가 가장 크게 나타나는 것은 확인할 수 있으나, 각 ECOC 코드별 노출지수의 차이가 MF 점수차이와 정확히 일치하지는 않았다. 이는 대상 자료가 여러 사업장에서 수집된 다양한 유해인자의 노출지수 값들이 혼합되어 있는 이질적 자료이기 때문이기도 하다. 따라서 본 연구에서 노출조건별 부여한 MF 점수는 객관적으로 정확한 정량적 상대 크기를 예측할 수 있는 고정된 값이라고 해석할 수 없으며, 향후 각 ECOC 코드를 적용한 노출평가 및 연구가 수행되고, 자료들이 많이 축적될 수록 더욱 정확한 예측 값으로 수정될 수 있을 것이다.

ECOC 코드의 시범 적용 가능성을 평가한 결과, ECOC 항목별 전문가의 응답율이 99% 이상으로 높았으며, Junior 그룹에서 일부 항목(국소환기 가동 여부)에서 판단하지 못한 건수가 나타났으나 전체 평가대상 건수의 0.7%로 매우 낮아 전반적으로 실용 가능성이 확인되었다. 특히 발생원과 작업자가 격리되지 않고 국소환기가 가동되지 않으며 근거리 작업이 대부분인 ECOC8 그룹에서 가장 높은 노출수준이 확인되었고, 노출지수를 활용한 통계분석에서 8개의 ECOC 그룹 간 노출 수준의 유의한 차이 ($P<0.001$)가 확인되었다. 이는 ECOC 코드가 작업자의 실제 노출 수준을 반영할 수 있는 유의미한 분류 체계임을 시사한다.

Figure 2에서 각 노출조건별 조합 수가 12개이지만 8개의 그룹으로 분석한 것은 최종 MF 점수가 동일한 집단 (ECOC 2a와 2b, ECOC 3a와 3b, ECOC 5a, 5b, 5c)은 유사한 노출수준을 가질 것이라는 가정에 기반한 것이다. 또한 세분화된 12개 ECOC 그룹별 비교를 하기에는 자료 수가 충분하지 않았기 때문이다. 따라서 향후 ECOC 코드를 적용한 노출평가 자료가 더욱 많이 축적된다면 12개의 ECOC 그룹별 비교 및 통계적 군집 분석 등을 통한 유사 노출그룹의 재분류도 가능할 것이다.

국내 WEMD와 유사한 정량적 노출평가 자료를 국가차원에서 조사하고 DB로 구축한 독일의 MEGA(Stamm, 2001)나 프랑스의 COLCHIC과 SCOLA(Mater et al., 2016)의 경우 모두 측정당시 국소환기가 가동중이었던지 등의 노출조건, 노출농도에 영향을 주는 작업 내용 (production activity) 등의 정보를 수집하도록 하고 있다. 또한 2002년부터 화학물질의 위험성을 정량적으로 예측하는데 활용될 수 있도록 '유럽화학물질 생태독성 및 독성센터(ECETOC)'가 개발한 ECETOC TRA(Targeted Risk Assessment)는 작업자의 노출평가 시나리오에 공정 범주(process category, PROC)를 활용하고 있다(Ishii et al., 2017). PROC은 노출시나리오의 특성을 고려한 범주라고 볼 수 있는데, 예를 들어 밀폐된 공정에서 노출우려가 없는 공정(PROC1)과 통제된 조건에서 간헐적 노출이 가능한 밀폐 연속 공정(PROC2)과 회분(batch) 공정(PROC3) 등 노출조건을 고려한 범주화의 특징을 보인다. 이렇게 노출 수준의 정확한 해석과 관리를 위해서는 노출 조건에 대한 정보는 필수적이다.

WEMD 자료는 법령에 기반하여 수집된 대규모 실측 자료임에도 불구하고, 기존에는 보고 양식이 법에 의해 정해져 있어 정량적 농도 정보 외에 구체적인 노출조건

을 반영하기 어려웠다. 본 연구에서 개발한 ECOC 코드는 이러한 한계를 보완하여, 동일 산업 및 공정 내에서도 작업 조건에 따라 달라지는 노출수준을 구체적으로 해석할 수 있도록 도와주는 도구가 될 수 있다. 또한 향후 직무노출 매트릭스(Job-Exposure Matrix, JEM) 구축 시에도 유의한 입력변수로 활용될 수 있으며, 노출감시체계 및 직업병 발생 예측 모델링의 정확도를 높이는 데 기여할 수 있을 것이다. 이를 위해서는 궁극적으로 산업안전보건법 시행규칙으로 정해져 있는 작업환경측정 보고양식에 노출조건을 확인 할 수 있는 변수를 추가할 수 있도록 법 개정이 필요하지만, 법 개정 전에 측정 결과를 전산 보고하는 K2B 시스템에 ECOC 코드를 추가하고 지정측정기관 산업위생전문가들의 자발적 활용을 유도하는 방안을 고려해 볼 수 있다.

다만, 본 연구는 다음과 같은 제한점이 있으며, 이를 보완할 후속 연구가 필요하다. 첫째, ECOC 코드 적용에 대한 시범평가는 동일 평가 대상에 대해 여러 전문가가 평가한 것이 아니고, 각각의 전문가가 실제 수행한 다양한 측정자료에 대해 주관적 평가에 기반한 것이기 때문에 평가결과의 정확도나 평가의 일치도를 확인할 수 없으며, 민감도, 특이도 분석 등 정량적 타당성 평가를 할 수 없는 제한점이 있다. 둘째, MF 점수는 국외에서 수행된 선행연구자료를 참고하여 임의로 할당된 값이기 때문에 노출조건별 상대적 노출크기를 정확히 예측할 수 있는 MF 점수는 향후 ECOC이 적용된 노출DB를 축적하여 재분석 될 필요가 있다.

V. 결 론

본 연구에서는 작업환경측정 자료의 노출조건 해석을 보완하고자, 개념적 노출평가 모델과 노출제어 효율 자료를 기반으로 ECOC 코드를 개발하였다. 개발된 ECOC 코드는 발생원 격리 여부, 국소환기 가동 여부, 근거리 작업 빈도의 세 가지 주요 노출변화요인을 조합하여 총 12개의 코드로 구성되었으며, 각 코드에는 상대적 노출 가능성을 반영한 무차원 점수(MF 점수)가 부여되었다.

지정측정기관에서 작업환경측정을 실시하는 산업위생 전문가 10명을 대상으로 시범 적용 결과, 전문가들이 각자 실시한 작업환경측정 사례에 대해 ECOC의 3가지 요소에 대해 높은 응답을 통해 노출조건 평가를 쉽게 할 수 있는 적용 가능성을 보였으며, ECOC 코드별로 화학

물질의 노출수준 분포에도 유의한 차이가 확인되었다($P<0.001$). 이는 ECOC 코드가 작업 조건에 따른 노출수준을 효과적으로 반영할 수 있는 분류 체계임을 보여준다. 따라서, ECOC 코드는 기존 작업환경측정 자료에서 확인할 수 없던 정성적 노출조건 정보를 보완함으로써, 향후 노출 감시체계 구축, JEM 개발, 그리고 직업병 예방정책 수립에 있어 실질적인 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 향후 다양한 산업군을 대상으로 한 적용성과 타당성 검증을 통해 본 코드의 범용성과 정확성을 확인하는 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 2024년 한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원 학술용역 지원 사업(2024-OSHRI-527)에 의해 수행되었으며, 시범 적용평가에 참여해 준 측정기관 산업위생 전문가분들께 감사드립니다.

References

- Cherrie JW, Soutar A, Tran CL, Cowie HA. Variability and uncertainty in chemical exposures for regulatory risk assessments. Research Report, TM/0404, Edinburgh, UK: Institute of Occupational Medicine; 2004.
- Cherrie JW & Schneider T. Validation of a new method for structured subjective assessment of past concentrations. *Ann Occup Hyg* 1999;43(4):235-245
- Choi S, Jeong JY, Im S, Lim DS, Koh D-H, et al. Standardization of work environment measurement information for constructing exposure surveillance system. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2019; 29(3):322-335
- Choi S, Park J-H, Koh D-H, Park D, Kim H-C, et al. Process standardization for the construction of job-exposure matrix using the work environment measurement database. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2023;33(1):78-90
- Creely K, Tickner J, Soutar A, Hughson G, Pryde D, et al. Evaluation and further development of EASE model 2.0. *Ann Occup Hyg* 2005;49(2):135-145
- Fransman W, Schinkel J, Meijster T, Van Hemmen J, Tielmans E, et al. Development and evaluation of an exposure control efficacy library (ECEL). *Ann Occup Hyg* 2008;52(7):567-575
- Hwang G. Study on the improvement of reliability

- assessment of work environment measurement in Korea. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2019;29(1): 50-56
- Ishii S, Katagiri R, Kitamura K, Shimojima M, Wada T. Evaluation of the ECETOC TRA model for workplace inhalation exposure to ethylbenzene in Japan. *J Chem Health Saf* 2017;24(1):8-20
- Mater G, Paris C, Lavoué J. Descriptive analysis and comparison of two French occupational exposure databases: COLCHIC and SCOLA. *Am J Ind Med* 2016;59(5):379-391
- Park J-H, Choi S, Koh D-H, Lim DS, Park D, et al. A pilot establishment of the job-exposure matrix of lead using the standard process code of nationwide exposure databases in Korea. *Saf Health Work* 2022; 13(4):493-499
- Rantanen J, Kauppinen T, Toikkanen J, Kurppa K, Lehtinen S, et al. Work and health country profiles. Country profiles and national surveillance indicators in occupational health and safety. *People and Work Research Reports* 2001;44:57-66
- Schneider T, Olsen I, Jørgensen O, Lauersen B. Evaluation of exposure information. *App Occup Environ Hyg* 1991;6(6):475-481
- Semple SE, Proud LA, Tannahill SN, Tindall ME, Cherrie JW. A training exercise in subjectively estimating inhalation exposures. *Scand J Work Environ Health* 2001;395-401
- Smith TJ, Hammond SK, Hallock M, Woskie SR. Exposure assessment for epidemiology: characteristics of exposure. *App Occup Environ Hyg* 1991;6(6):441-447
- Stamm R. MEGA-database: one million data since 1972. *App Occup Environ Hyg* 2001;16(2):159-163
- The Jamovi Project. jamovi. (Version 2.6). 2024
- Tielemans E, Schneider T, Goede H, Tischer M, Warren N, et al. Conceptual model for assessment of inhalation exposure: defining modifying factors. *Ann Occup Hyg* 2008;52(7):577-586
- Woskie SR, Hammond SK, Hines CJ, Hallock MF, Schenker MB. Algorithms for estimating personal exposures to chemical agents in the Semiconductor Health Study. *Am J Ind Med* 1995;28(6):699-711

<저자정보>

최상준(교수), 임대성(교수), 김환철(교수), 박주현(교수), 고동희(교수), 박동욱(교수), 오수민(대학원생), 서회경(연구원)