

직업 역학연구에서 과거 유해 인자 노출 평가 고찰: 직무 노출 매트릭스(Job Exposure Matrix) 활용

박동욱^{1*} · 이승희¹ · 조경이²

¹한국방송통신대학교 보건환경학과, ²서울대학교 보건대학원 환경보건학과

Retrospective Exposure Assessment in Occupational Epidemiology: A Review with a Focus on Job Exposure Matrices

Dong-Uk Park^{1*} · Seunghee Lee¹ · Kyung Ehi Zoh²

¹Department of Environmental Health, Korea National Open University

²Department of Environmental Health, Graduate School of Public Health Seoul National University

ABSTRACT

Objectives: The purpose of this study is to compare and review various retrospective exposure variables used in occupational epidemiology, focusing on their characteristics, strengths, and limitations. In particular, it aims to examine the role of Job-Exposure Matrices (JEMs) in complementing quantitative data and supporting causal inferences between occupational factors and disease outcomes.

Methods: Literature was selected and qualitatively summarized based on the author's expertise and judgment, without a systematic search strategy. In particular, JEMs, despite their qualitative nature, were emphasized for their ability to systematically integrate job-based information, thereby reducing exposure misclassification and compensating for limitations in quantitative data.

Results: This study compared and summarized various retrospective exposure variables used in occupational epidemiology and detailed their characteristics, strengths, and limitations. JEMs, as a qualitative exposure variable, were found to complement the limitations of quantitative data and to integrate job-based exposure information. Moreover, JEM-based exposure variables that combine exposure duration and job information were highlighted as effective tools in retrospective epidemiological studies for elucidating the associations between occupational factors and disease outcomes. The findings of this study may serve as a useful basis for establishing strategies for retrospective exposure assessment in future epidemiological research.

Conclusions: The findings provide practical guidance for selecting suitable exposure variables and designing effective past exposure assessment strategies in future studies of chronic disease risk.


Key words: job, job-exposure matrices (JEMs), past exposure variables, retrospective occupational epidemiologic studies


I. 서 론


노동자 집단에서 발생한 암 등 만성질환(이하 질병)의

위험은 노동자가 수행한 직무(job), 작업환경, 작업공정 등에서 발생하는 유해 인자에 대한 노출(이하 노출 변수)과 연관이 있는지 감시(surveillance)하거나 규명할

*Corresponding author: Dong-Uk Park, Tel: +82-2-3668-4707, E-mail: pdw545@gmail.com
Department of Environmental Health, Korea National Open University, 86 Daehak-ro, Jongnogu, Seoul, 03087
Received: August 29, 2025 Revised: October 11, 2025, Accepted: October 23, 2025

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

 Seunghee Lee <http://orcid.org/0000-0003-4693-811X>

 Kyung Ehi Zoh <https://orcid.org/0000-0002-2821-070X>

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.

필요가 있다. 후향적 직업 역학연구(retrospective occupational epidemiological study)에서는 질병 발생에 영향을 미쳤으리라 의심되는 과거 직무 연관 노출 변수에 대한 노출평가가 핵심이다. 질병은 과거 일정 기간 수행한 직무 및 그와 연관된 직접적 또는 간접적인 노출과 밀접하게 연관될 수 있기 때문이다.

노동자 집단의 특정 질병 발생 위험을 평가하기 위해 고려할 수 있는 잠재적 노출 변수는 다양하다. 예를 들어 근무 기간, 근무 시작 시기, 담당 직무와 공정, 노출된 유해 인자 수준 등 직무와 연관된 개별 또는 복합 노출이다. 이러한 변수들은 질병 발생의 원인이 될 만한 잠재적 노출지표(potential exposure proxies)로 활용될 수 있다. 그러나 보통 질병이 진행되는 데 오랜 시간이 걸리기 때문에 유해 인자를 직접 측정하는 일은 사실상 불가능하며, 과거 직무 연관 노출 변수에 대한 상세 정보 기록 확보도 쉽지 않다. 이러한 직무 연관 노출 변수들은 정보의 정밀도, 활용 가능성, 노출 분류 오류(exposure misclassification) 위험 등에서 차이를 보인다. 따라서 연구 대상 노동자 집단에서 발생한 질병의 종류에 따라 원인 노출 변수를 단독 또는 결합하여 질병 발생 위험과의 연관(association)이나 인과(causality)를 분석해야 한다.

본 연구는 노동자 집단에서 발생한 질병의 직무 연관 위험 요인을 규명하기 위한 후향적 직업 역학연구에서 과거 노출을 추정하기 위한 잠재적 노출 변수의 정의, 활용 방법, 장단점을 고찰하였다. 특히, 직무 정보를 기반으로 과거 노출을 추정하는 직무 노출 매트릭스(job exposure matrix, JEM)의 활용 가능성과 의의를 중점적으로 고찰하였다. 본 고찰은 후향적, 전향적 직업 역학연구 등 산업보건 분야에서 현재 노출평가의 정밀도를 높이는 데도 기여할 것으로 판단한다.

II. 연구 방법

본 연구는 과거 직무 연관 노출 변수의 전반적인 개요와 비교를 제공하기 위하여, 과거 노출을 추정할 수 있는 여러 노출 변수를 비교하고 정리하는 서술적 고찰(narrative review)로 mini review의 고찰 방법을 활용하였다. 정량적인 자료를 통합하고 체계적으로 고찰하는 형식(comprehensive, systematic, meta-analysis 등)이 아니라 저자의 임의적 전문성에 근거한 연구로, 과거 노출에 대한 연구자의 전문성과 판단에 따라 연관 문

헌과 적용 사례를 선택하고 정리하였다. 기업과 산업, 노동자를 대상으로 수행하는 직업 역학연구(industry-based epidemiological study)를 중심으로 하였으며, 일반 인구를 대상으로 수행한 연구(general population-based epidemiological study)는 참고 수준으로 일부 비교하여 설명하였다(Baumeister et al., 1997; Lau et al., 2016). 본 연구에서는 과거 직무 연관 노출 변수들(예: 근무 기간, 시작 시기, 직무, 직업, 산업, JEM, 생물학적모니터링, 작업환경측정 자료 등)의 정의, 구하는 방법, 장점과 한계, 그리고 대표적인 역학연구 적용 사례를 설명하였다. 본 연구에서 활용한 역학연구 등 자료는 동료 심사를 거친 과거 노출평가 방법, 직무 특성, 활용성 등의 논문을 정리한 것이다. 연관 문헌 검색에 사용한 키워드(keyword)는 past exposure, retrospective exposure, job exposure matrix, cumulative exposure dose로, 단독 또는 조합하여 PubMed와 Google Scholar에서 검색하였다.

III. 결 과

1. 과거 직무 노출 변수 확보

노동자의 과거 노출 변수 정보를 확보하는 방법에는 여러 가지가 있다(Table 1). 노출 변수는 국가 패널자료, 연구 대상 기업의 노출 관련 기록, 구조화된 설문 응답, 개별 또는 그룹 인터뷰, 국가 차원의 규제 변화 시점, 전문가의 판단 등 다양한 출처를 통해 확보할 수 있다. 수집한 정보는 근무 시기, 직무 특성과 결합하여 연구 대상자별 타당한 노출 변수로 재구성하며, 이는 정성적 또는 정량적 변수로 변환하여 역학 분석에 활용한다. 각 노출 변수의 확보 가능성과 적용 범위는 연구 대상 질병의 특성, 대상 노동자 집단의 직무 구조, 해당 국가의 노동과 건강 연관 자료 관리 수준 등에 따라 달라진다. 따라서 연구 목적과 질병 특성에 부합하는 과거 노출 정보를 확보하고, 이를 연구 맥락에 맞게 변수화하고 분석하는 전문가의 판단이 필요하다(Table 2).

2. 표준 산업(Standard Industry Classification, SIC)과 표준 직업(Standard Occupational Classification, SOC)

표준 산업(Standard Industry Classifications, SIC, 이하 산업)과 표준 직업(Standard Occupation Classifications, SOC, 이하 직업) 분류는 국가의 공중보건 감시체계에

Table 1. Brief descriptions of methods used to investigate past workers' job exposure history in an occupational epidemiological study

Method	Brief description
National statistics	National statistics on occupational exposure, such as standardized industry and occupational classification (SIC and SOC)
Structured questionnaires	Detailed self-reported information on job roles, tasks, duration, and frequency of exposure
In-depth interviews	Interviews with workers and supervisors to validate and enrich data from questionnaires
Company employment records	Personnel files, work assignments, and records to verify job titles, durations, and specific roles
Historical industrial hygiene data	Review of archived air monitoring results, bulk samples, and other measurements to assess past exposure levels
Site visits and observations	Visits to former work locations to observe work practices and assess the working environment
Maintenance and production logs	Analysis of historical logs and work orders that document tasks and chemical usage
Consultation with experts	Judgements from occupational health experts interpreting historical work conditions and exposures
Regulatory and historical documentation	Review of past regulations, inspection reports, and technical bulletins to better understand changes in practices over time

[서 직무 연관 노출 변수로 활용된다. 직업은 같은 유형의 일을 하는 여러 유사 직무 그룹을 포함한다. 직업 또는 직무 변수는 질병 발생 위험을 직업별로 비교하는 단면 역학연구에서 자주 활용한다. 표준 직업별 질병 발생 위험 규모 파악은 국가 차원에서 수행하는 정책이나 연구 등에서 집중할 수 있는 직업 그룹을 파악하는 정책적 가치가 크다(Pukkala et al., 2009; Boffetta et al., 2010; Purdue et al., 2015). 대부분 국가별 표준직업분류 체계와 국가 자료를 제공하고 있지만, 안전보건 분야에서 활용하는 경우는 많지 않다 (Table 2). 우리나라는 통계청, 고용노동부 등에서 발표하는 표준 직업 정보가 있지만, 직업보전은 물론 공중보건 감시체계에서 이 자료를 활용한 적은 없다. 또한 직업별 암 발생 위험을 비교한 연구도 드물다(Park et al., 2025).

표준화된 산업·직업 코드는 JEM 등 다른 노출 변수와 연계하여 활용할 수 있을 뿐만 아니라 국가 단위의 인구주택총조사나 고용직업분류, 암센터, 건강보험, 노동력 조사 자료 등과 병합 분석이 가능하다는 장점이 있다. 반면, 산업, 직업 등은 근무 기간, 특정 유해 인자 노출수준의 차이로 분류 오류(misclassification)를 초래할 수 있다. 산업·직업 기반 노출평가는 대규모 역

학조사에는 유용하지만, 개인 수준의 노출수준 차이, 시간적 변화, 정확한 원인 인자 노출을 규명하는 데는 한계가 있다(Beard et al., 2024). 따라서 직업 그룹 간의 유의한 질병 발생 차이가 관찰된 경우, 추가로 보다 정밀한 원인 규명을 위한 역학조사를 할 필요가 있다.

3. 직무 연관 노출 변수

노동자의 근무 기간에 과거 직무와 유해 인자 노출 이력을 추정할 수 있는 변수는 다양하다(Table 2). 개별 변수만으로는 과거 근무 기간의 직무 이력과 유해 인자 노출수준 추정이 어려울 뿐만 아니라 유사한 노출 그룹을 만들기가 어려워 노출 분류 오류가 발생할 수 있다. 가장 중요한 것은 연구 대상 개인별로 노출수준, 노출 특성을 잘 구분하여 노출 특성을 가능한 한 유사하게 만들 수 있는 노출 변수를 확보하는 것이다. 예를 들어 특정 유해 인자에 대한 개별 노동자의 근무 시기별 노출수준 자료와 누적 노출수준에 대한 정보를 모두 확보할 수 있다면, 개인별 질병에 대한 잠재적 원인 유해 인자에 대한 변수로서 최적이다. 그런데 근무한 동안 특정 유해 인자에 대한 노출 자료가 없다면, 직무 연관 변수를 묶은 JEM을 활용하는 것이 좋다. JEM은 근무 시기와 당시 맡았던 직무, 공정 등에 근거한 특정 유

Table 2. Summary of the strengths and limitations of retrospective exposure variables used in an occupational epidemiological study examining chronic health effects

Variable	Strengths	Limitations
Standard Industry Classification (SIC)	<ul style="list-style-type: none"> Ease of obtaining SIC information as national statistics 	<ul style="list-style-type: none"> Exposure characteristics are heterogeneous among subjects within the same SIC category
Standard Occupational Classification (SOC)	<ul style="list-style-type: none"> Ease of obtaining SOC information in the form of national statistics if a nation has an SOC system Uniform coding allows linkage with national databases Compatible with JEM and exposure databases Enables integration with labor or census data 	<ul style="list-style-type: none"> Exposure characteristics are not similar subjects within the same SOC category Wide variability of tasks Exposures within a single code Lacks task-specific exposure details Risk of misclassification if coding is inaccurate
Job title	<ul style="list-style-type: none"> Available in records, links to JEMs Can reflect long-term exposure patterns Ease of obtaining from employment records 	<ul style="list-style-type: none"> Lacks specificity in individual exposure levels Exposure variability within same job title
Specific work tasks	<ul style="list-style-type: none"> More precise than job title 	<ul style="list-style-type: none"> Difficult to obtain, recall bias possible
Employment duration	<ul style="list-style-type: none"> Helps estimate cumulative exposure 	<ul style="list-style-type: none"> Does not reflect job changes or working hours Does not reflect differences in exposure among job types, processes and work
Year of hire	<ul style="list-style-type: none"> Ease of obtaining information from companies Accounts for historical changes 	<ul style="list-style-type: none"> Requires historical exposure data Does not reflect differences in exposure among job types, processes and work
Industry type	<ul style="list-style-type: none"> General indication of exposure, links to databases 	<ul style="list-style-type: none"> Too broad, exposure varies within industry
Exposure measurement data including cumulative exposure level	<ul style="list-style-type: none"> Most accurate exposure estimates Objective, quantitative data 	<ul style="list-style-type: none"> Rarely available for past exposures Does not account for exposure factors other than inhalation Historical data may be limited or missing
Frequency of exposure	<ul style="list-style-type: none"> Captures repeated or intermittent exposure effects 	<ul style="list-style-type: none"> Often hard to estimate accurately
Biomonitoring data	<ul style="list-style-type: none"> Measures internal exposure Can confirm exposure to specific carcinogens 	<ul style="list-style-type: none"> Short-term only, not useful for historical exposure Rarely available for past exposure Costly and technically demanding
Job exposure matrix (JEM)	<ul style="list-style-type: none"> Standardized, useful when data are lacking Suitable for large-scale studies. Provides standardized assessments. Estimates exposures based on task history. 	<ul style="list-style-type: none"> Based on generalizations, may not reflect variation

해 인자 노출수준이나 확률을 정성적으로 추정할 수 있기 때문이다.

1) 근무 기간과 근무 시작 시기 등

근무 기간, 처음 근무 시작 시기 등은 쉽게 구할 수 있는 노출 연관 정보이며, 대부분 직업 역학연구에서 기본적으로 활용하는 과거 노출 변수이다. 근무 기간은 정량적 또는 정성적으로, 3분위 또는 4분위 등으로 범주화(classification)할 수 있다. 그러나 단지 근무 기간만으로 건강 영향과의 연관을 규명하는 것은 한계가 있

다. 동일한 근무 기간이라도 근무 시작 시기 등에 따라 노출 인자와 노출수준은 크게 다를 수 있기 때문이다.

처음 입사 연도(year of first job)는 원인 유해 인자에 대한 누적 노출을 계산하고 노출 기간을 고려한 역학적 노출평가에 자주 사용된다(Lillienberg et al., 2013). 처음 입사 연도의 범위는 문헌을 참고하거나 임의로 범주화할 수 있다. 여기에 직무나 공정을 결합하면 노출수준 분류의 오류를 줄일 수 있다. 처음 입사 연도를 범주별로 분류하면 상대적으로 열악한 공정, 직무 환경, 노출 기준 변화, 특정 화학물질 사용 제한이나 금

지, 공학적 기술 개선 등의 영향을 알 수 있다. 노동자의 처음 입사 연도에 따라 백석면 누적 노출수준 차이를 분석하고 첫 입사 시점이 빠를수록, 즉 누적 노출 기간이 길수록 암 사망률이 증가하는 경향이 있음을 보고한 연구도 있다(Felettto et al., 2022).

2) 직무 노출 매트릭스(job exposure matrix)

JEM은 직업 또는 직무별로 유해 인자에 대한 노출수준이나 노출 가능성을 체계적으로 추정하기 위해 사용하는 노출 변수이다. 직무나 직업을 기반으로 근무 시기별 유해 인자 노출 가능성, 유해 인자 노출수준 등을 결합하여 암 등에 대한 노출 변수로 활용한다.

(1) 근무 시기와 직무 결합

근무 시작 시기를 특정 시기(연도) 기준으로 전과 후로 구분하여 이원화하고, 각 시기에 가장 오래 수행한 직무, 직업과 결합한 변수이다. 연구 대상 질병에 유의한 영향을 미치는 유해 인자 규제 시기나 노출 기준 변화 시기에 대한 영향을 규명할 수 있다. 예를 들어 석면 사용 금지 시기, 벤젠 노출 기준이 변화한 시기 등을 규명할 수 있다.

(2) 근무 기간, 직무, 유해 인자 노출수준 결합

핀란드(Finland JEM, FINJEM), 유럽, 캐나다(Canada JEM, CANJEM) 등 많은 국가에서 JEM을 구축하고 암과 직업병 등 공중보건 시스템에 많이 활용한다. 국가별로 JEM을 활용한 주요 역학조사 연구를 요약하였다(Table 3). 표준 직업코드를 연구 대상자의 직업 이력에 부여한 후, 이를 JEM의 직무 축에 대입하고, 전문가 판단과 기존 노출 자료에 근거하여 직업(직무)별 유해 인자 노출 확률과 강도를 최종적으로 결합한다. 이후 근무 시기와 기간, 전문가 평가를 추가로 반영하고, 가능하다면 누적 노출수준까지 산출하여 역학연구의 노출 변수로 활용한다.

이때 화학물질 등 주요 유해 인자에 대한 노출수준을 추정하려면 시기별로 노출을 대변할 수 있는 측정 결과나 직무 연관 기록이 있어야 한다. 정량적 측정 결과가 없더라도 특정 기간 노동자가 수행한 직무 분석을 통해 특정 유해 인자 노출수준을 고(높음), 중(중간), 저(낮음) 등으로 범주화할 수 있다(아래 3)항 참조). JEM은 대규모 집단 역학연구에서 접근이 쉽고 비용이 적게 들지만, 개인별 직무 변화나 노출수준을 평가하지 못한다는

한계점이 있다(Table 5).

3) 유해 인자 노출

(1) 유해 인자 노출 여부

연구 대상 질병 발생 위험과 잠재적 유해 인자에 대한 노출 확률(exposure prevalence or exposure probability)로, ‘예/아니오’ 또는 ‘확실/가능’ 등으로 범주화할 수 있다. 변수는 특정 개별 유해 인자일 수도 있고, 유기용제, 먼지, 방사선 등 포괄적 유해 인자 그룹이 될 수도 있다. JEM 연구에서 직무 수행 시 발생하는 유해 인자 노출 여부는 문헌에 따라 어렵지 않게 평가할 수 있다. 세부 직무(task, work), 직무 수행 시기, 화학물질 사용 변화 등에 따라 노출수준을 정성적으로 추정할 수 있다.

(2) 유해 인자 누적 노출수준(cumulative exposure level, ppm-years)

연구 집단 노동자의 개별 근무 기간과 해당 시기별 노출수준을 결합한 정량적 노출 변수이다. 개인별 근무 기간에 누적된 노출수준으로 질병 위험을 추정할 때 사용된다. 일정 기간별(5년 또는 10년 등) 노출수준을 동일하게 가정하고 누적하여 구한다. 노출수준은 주로 호흡기로 누적 노출된 수준을 말하는데, 입사한 시기부터 질병 진단 시기 또는 연구 대상 시점까지 일정 기간별 노출을 대표할 수 있어야 한다. 기업에서 유사 노출 노동자 그룹별로 근무 기간에 정기적으로 측정된 질병 연관 유해 인자에 대한 정량적인 측정 자료가 있어야 추정할 수 있다. 정량적인 유해 인자 노출 자료가 없거나 대표적인 노출수준을 대변하지 못하는 경우, 유사한 공정에서 보고한 외부 자료를 활용한 경우도 있다. 정량적 혹은 정성적 개인별 유해인자 누적노출수준은 직무 변화에 따른 유해인자 노출을 반영할 수 있어 질병 발생에 영향을 미치는 유해인자를 규명할 수 있는 장점이 있다.

(3) 생물학적 노출 모니터링

개인별, 시기별 생물학적모니터링 자료는 가장 이상적인 노출 변수이다. 영국 산업안전보건청(HSE)은 1996년부터 2016년까지 소변 중 S-phenylmercapturic acid(SPMA, 벤젠 대사산물, n=9,188), 혈액 중 납(n=37,474), 소변 중 수은(n=11,723) 등 생물학적모니터링 결과 95만 건 이상을 분석하여 산업장에서 노출 경향

Table 3. Brief summary of job exposure matrixes (JEM) and studies using a JEM which have been developed in several countries and are used in occupational epidemiological studies

JEM name	Country	Main application	Major references
FINJEM	Finland	Provides time-specific estimates of exposure prevalence and average levels for over 80 agents by occupation since 1945. Based on measurement data, literature, and expert judgement, it is widely used in epidemiological, surveillance and other applications in Finland and other countries.	<ul style="list-style-type: none"> • Use of the Finnish Information System on Occupational Exposure (FINJEM) in epidemiologic, surveillance, and other applications • Occupational exposure assessment tools in Europe: A comprehensive inventory overview
CANJEM	Canada	Based on the probability and intensity of exposure to 258 agents by occupation. It was developed using work history data from more than 30 Canadian case-control studies conducted between 1985 and 2021.	<ul style="list-style-type: none"> • Availability of a new job-exposure matrix (CANJEM) for epidemiologic and occupational medicine purposes • Development of and selected performance characteristics of CANJEM, a general population job-exposure matrix based on past expert assessments of exposure
N-JEM	Norway, Sweden, Denmark	<ul style="list-style-type: none"> • Designed to assess occupational exposure to 30 asthma-related agents based on ISCO88 job codes, without time stratification • Exposures are qualitatively classified as high, possible, or unexposed. 	<ul style="list-style-type: none"> • Exposures and asthma outcomes using two different job exposure matrices in a general population study in northern Europe • Update of an occupational asthma-specific job exposure matrix to assess exposure to 30 specific agents
US-JEM	USA	Developed by the CDC/NIOSH from the N-JEM, categorises probable or possible exposure to 19 asthma-causing agents based on SOC-2010 job codes and 2015 U.S. workforce data. However, it does not categorise exposure by historical time periods.	Development of an asthma-specific job exposure matrix for use in the United States
NOCCA-JEM	Five Nordic Countries	FINJEM was used as the basis for analyzing occupational cancer risks across five Nordic countries, with harmonised occupational codes and adjusted exposure estimates per country. The structure of the Nordic JEMs is three-dimensional (over 300 occupations, over 20 agents, and four periods covering 1945-1994).	Construction of job-exposure matrices for the Nordic Occupational Cancer Study (NOCCA)

Abbreviation: FINJEM = Finnish JEM; CANJEM = Canadian JEM; N-JEM = Norwegian JEM; NOCCA-JEM = Nordic Occupational Cancer Study JEM

과 규제 효과를 평가하였다(Morton et al., 2022). 그러나 근무 기간 지속적인 시료 채취 어려움, 과거 노출 대표성, 윤리적 문제, 비용 등으로 만성질환 위험을 규명하기 위한 역학조사에서 활용된 경우는 거의 없다.

IV. 고 찰

질병 발생 위험의 직업적 원인을 규명하기 위한 역학 연구에서는 직업, 직무, 유해 인자 등에 대한 과거 노출 특성을 파악하고 평가해야 한다. 그러나 과거의 원인으

로 의심되는 유해 인자에 대한 직접 측정은 불가능하고, 활용할 수 있는 정량적 자료나 기록이 부족한 경우도 많다. 따라서 연구 대상자의 고용 이력과 연관된 산업, 직업, 직무, 근무 기간, 근무 시작 시기, 공정, 노출 유해 인자 등 여러 정성적 노출 변수를 단독 또는 층화 결합하여 잠재적 원인 노출 변수로 활용해야 한다. JEM은 고용 이력과 연관된 변수들을 직무 기반으로 묶어 과거 노출 변수의 핵심 변수로 사용된다. 본 연구에서는 질병 발생 위험의 원인을 규명할 때 활용할 수 있는 JEM을 중심으로 직무 연관 노출 변수들을 확보하는 방

법, 활용할 때의 장점과 한계를 고찰하였다.

직무 연관 노출 변수는 국가 통계, 직접 설문, 회사 기록, 그룹 인터뷰 등을 통해 구할 수 있다. 직업적 노출 변수의 근원과 종류에 따라 역학연구 방법은 물론 질병의 원인 규명 수준도 달라진다. 이 중 국가가 정기적으로 제공하는 여러 통계 자료(고용보험, 건강보험, 암센터 자료 등)는 표본 수가 크고 확보가 쉬워 비용 대비 효율적이고 대표적인 노출 추정 방법을 제공한다는 장점이 있으나, 연구 대상자의 개별 직무 정보나 유해 인자 노출에 대한 세부 정보가 제한적이어서 질병과 노출 간의 연관성이나 인과성을 규명하는 데는 분명한 한계가 있다. 또한 국가가 제공하는 일반 인구의 산업이나 직업 기반 노출평가는 노출 분류 오류의 위험이 있다. 국가 패널자료를 활용한 연구 결과는 주로 질병 위험과의 연관성을 제시하는 가설 수립이나 초기 탐색적 분석에 활용된다. 표준 산업과 표준 직업은 암 등 국가 질병 감시 노출 변수로 유용하다.

특정 산업, 업종, 지역을 대상으로 수행할 직업적 역학연구에서 직무 노출 변수는 연구 대상자 설문 응답으로 구하는 것이 최선이다. 여러 기업이 연관되기 때문에 기업의 자료를 활용하는 것은 어렵다. 직접 설문을 통해 연구 대상자의 과거 직무 이력, 과거 노출 경험, 건강 상태, 가족력 등을 포괄적으로 수집하는 방식은 노출 이력에 대한 구체적인 정보를 확보할 수 있어 인과관계 분석에 유리하다. 그러나 설문조사는 응답자의 기억력, 인지 편향(recall or cognitive bias) 등에 영향받을 수 있다는 한계도 있다. 따라서 연구 목적과 대상 질병 및 원인 유해 인자에 적합하도록 신뢰성 있고 타당한 구조적 설문지(structured questionnaire)를 개발해야 한다. 잠재적 유해 인자 발생, 노출과 연관 있는 공정, 직무 등에 대해 과거부터 현재까지 주요 변경 내용을 잘 조사할 수 있는 내용을 설문에 반영하고, 설문 결과를 전문가가 판단하여 노출 변수로 활용하는 것이 중요하다. 연구 목적에 맞게 직접 개발한 구조적 설문지를 활용하면 고용 기간, 근무 시작 시기, 직무 이력, 화학물질 취급 등 다양한 노출 변수를 구할 수 있다. 그러나 특정 유해 인자에 대한 연구 대상자 노출은 직접적으로 구할 수 없어 개별 직무 특성에 따라 외부에서 보고한 연구에 맞는 정량적 측정 자료를 대입한다.

특정 기업을 대상으로 수행하는 역학조사에서는 설문은 물론 기업이 보관한 작업환경측정 자료, 직무 기록, 화학물질 사용 내역 등 자료, 노동자 인터뷰 등을 통해

구체적인 노출 변수를 확보할 수 있다. 그러나 기업이 개별 노동자의 직무 이력은 물론 고용 기간을 대표할 수 있는 정량적 측정 자료를 기록하는 경우는 드물다. 따라서 확보한 개별 노출 변수들을 단독 또는 총화하고 역어서 질병 발생 위험의 잠재적 원인 노출 변수로 설정한다. 이때 대부분 정성적으로 노출 변수를 분류하고 범주화한다. 연구 대상자를 분류하고 범주화할 때 가능하면 노출 특성은 유사해야 한다. 즉, 직무 그룹, 근무 기간, 유해 인자 그룹, 유해 인자 노출 확률과 수준 등이 같거나 비슷해야 한다. 범주화할 노출 변수의 개수(number)는 노출 분류 오류, 암 등 질병 발생자 수 분포 등을 참조하되, 4개를 넘지 않는 것이 좋다.

단일 변수만으로는 과거 직무 등 유해 인자 노출을 추정하고 암 등 발병 위험과의 연관이나 인과를 규명하기 어렵다. 이럴 때는 JEM을 이용하는 것이 좋다. JEM은 직무를 기준 축으로 노출 기간(고용 기간), 유해 인자 노출 여부와 노출수준 등을 결합하여 연구 대상자의 과거 노출수준의 차이를 재구성할 수 있는 생성형 노출 변수이다. JEM을 통해 국가 패널자료, 연구 대상 기업이 보유한 기록, 구조화된 설문 응답, 개별 연구 대상자 인터뷰, 국가 차원의 규제 변화 시점, 전문가 판단 등 유용한 노출 변수들을 직무 기반으로 결합하여 연구 대상 그룹을 노출 특성의 유사성에 따라 분류할 수 있다. 국가 자료 등 패널 통계와 직업(직무)에 해당하는 JEM을 연결하여 직업별, 유해 인자별 JEM으로 통합하고, JEM과 질병 발생 위험과의 연관성을 분석할 수 있다. 기준이 될 수 있는 직업별, 유해 인자별 JEM은 작업환경측정 자료, 특수건강진단 자료 등을 통해 구축할 수 있다. 핀란드(FINJEM), 캐나다(CANJEM), 북유럽(NOCCA JEM) 등은 JEM을 활용하여 직업별 유해 인자 노출수준과 암 발생 위험을 추정하였다(Kauppinen et al., 1998; Pukkala et al., 2009; Xu et al., 2022). FINJEM은 1945년부터 최근까지 약 5~10년 단위로 시기를 구분하고, 직업별 유해 인자 노출수준과 노출 여부를 결합하였다. 덴마크, 노르웨이, 스웨덴, 아이슬란드 등 북유럽 5개국이 참여한 The Nordic Occupational Cancer Study(NOCCA)에서는 FINJEM을 기반으로 각국의 직업 분류와 노출 환경을 반영한 국가별 JEM을 구축하여 직업 분류체계를 맞추고, 각국의 노출 차이를 반영하여 암 발생과의 연관성을 평가하였다. 이 연구에서는 300개 이상의 직무, 20여 개의 유해 인자, 4개의 유사 노출 근무 기간(1945~1994년 중

Table 4. Examples of major countries with national standard occupational classification databases

Country	Database	Organization	Key features & applications	URL	Reference
USA	O*NET	U.S. Department of Labor	Detailed data on 900+ occupations (skills, physical demands, work environment); used for physical exposure JEMs	https://www.onetcenter.org/	(ONET, 2025)
Canada	NOC / CANJEM	ESDC (Gov. of Canada)	National job classification; basis for CANJEM (chemical exposure JEM)	https://noc.esdc.gc.ca/?GoCTemplateCulture=en-CA	(Canada, 2025)
EU	ESCO	European Commission	ISCO-linked database of skills, competences, and occupations	https://esco.ec.europa.eu/en	(EC, 2025)
Italy	Italian O*NET-based JEM	Italian Research Consortium	Adapted O*NET for ergonomic exposure assessment; developed Ergo-Index	https://www.onetcenter.org/	(ONET, 2025)
South Korea	KSCO (Korean Standard Classification of Occupations)	Statistics Korea	Provides standardized job classification and coding system; currently lacks detailed task and exposure data. No case has been used in occupational epidemiological study	https://kssc.kostat.go.kr:8443/ksscNew_web/ekssc/main/main.do#	(KOSTAT, 2025)

Abbreviation: O*NET = Occupational Information Network; NOC = National Occupational Classification; ESDC = Employment and Social Development Canada; ESCO = European Skills, Competences, Qualifications and Occupations

4개 기간 구분)을 기준으로 3차원 매트릭스를 구성하였다. 또한 FINJEM을 활용한 국제 연구인 INTEROCC에서는 유기용제, 금속, 디젤 자동차 배출가스, 석면 등에 대한 노출 여부와 뇌종양(예: 교모세포종) 간의 연관성을 평가했으나, 대부분의 유해 인자에서 유의한 노출-반응 관계는 확인되지 않았다. 미국에서는 O*NET과 SOC 직업코드를 기반으로 인체공학적·물리적 노출 JEM을 구축하여 근골격계질환과 같은 직업성 질병 연구에 적용하였다(Evanoff et al., 2014)(Table 4).

연구 대상 질병 발생에 영향을 미치는 인자에 대한 금지, 규제, 노출 기준 변화 등의 시기를 변수화하여 JEM에 결합하면 노출 추정의 정확도를 높일 수 있다. 예를 들어 석면과 벤젠 등 발암물질 금지 시기나 노출 기준 변화 등이다. 또한 디젤 자동차 배출가스를 제한하기 위해 유럽연합에서 정한 자동차 배기가스 배출 연도별 기준(EURO 1, 1992, EURO 2, 1996, EURO 3, 2000, EURO 4, 2005, EURO 5, 2009, EURO 6, 2014)(EPRS, 2023)을 일반 인구, 작업장, 운전 직업 그룹 등에서 발생하는 자동차 배출가스 관련 질병과의 연관성을 분석할 때 활용할 수 있다. 예를 들어 우리나라의 석면 사용 전면 금지 시점(2011년), 벤젠 등의 노출 기준 변화 시기(1986~2003년 10ppm, 2003~2016년 1ppm, 2016~현재 0.5ppm)를 반영한 노출 범주를 생성하면, 규제 이전과 이후의 노출수준 차이를 고려한 정밀한 노출-질병 관계 분석이 가능하다.

JEM은 개인 노출평가에서 두 개의 핵심 요소인 유해 인자 농도와 노출 기간이 결합한 변수이다. 여기서 노출 기간은 화학물질 사용량과 취급량 변화, 공정 개선, 노출 기준 변화 등으로 인해 노출수준이 상대적으로 일정하게 유지된 시기를 의미한다. 현재 노출평가는 주로 최근 노출수준이 향후 일정 기간 동일한 직무·작업환경을 대표한다고 가정하여 이루어진다. 반면, 과거 노출평가에서는 과거 특정 시점이나 시기에 해당 직무·작업 조건을 반영하여 노출수준을 추정한다. JEM의 노출 기간 등 노출 변수에 유해 인자에 대한 대표적인 공기 중 또는 생물학적 노출수준을 결합하면 연구 대상자의 노출 특성을 구별하는 데 있어 최선의 접근이다. 그러나 과거 근무 시기별, 개인별/세부 직무별 누적 노출수준 추정을 위한 자료가 매우 부족한 까닭에 연구 대상자의 근무 기간에 대표적인 정량적 노출수준을 구하는 것은 매우 어렵다. 이들이 있다고 하더라도 특정 시기의 일부이거나 특정 시기를 대표할 수 없는 경우가 많다. 그럼에도 이론적으로 질병 발생 위험과 연관, 양-반응 관계를 규명할 수 있는 가장 이상적인 유해 인자에 대한 누적 노출 자료(ppm-year 등 농도 수준-year)이기 때문에 내부 자료, 외부 자료, 전문가 판단으로 노출수준을 정량적으로 추정하는 것은 필요하다. 예를 들면 노동자가 어떤 물질에 5년 동안 매년 0.1개/cc, 10년 동안 매년 0.5개/cc 노출되었을 때 총 누적 노출수준은 5.5개/cc-year (0.1 개/cc-year × 5년 + 0.5개/cc-year × 10년)이

Table 5. Summary of the strengths and limitations of JEMs

Strengths	Limitations
<ul style="list-style-type: none"> Useful for studying large populations, including rare diseases like cancer Reduces the need for costly and time-consuming direct exposure measurements Incorporates past job and exposure information, helpful for long-term health effects Consistent assessment of exposure across different workers and workplaces Ideal for cohort or case-control studies involving large groups 	<ul style="list-style-type: none"> Expert assessments can lead to incorrect classification of exposure levels Only provides group-level estimates, lacks details of individual exposure Does not account for job changes or different exposure levels during a career Assumes all workers in a job category have the same exposure, which may not be true May not capture subtle differences in exposure that could affect health risks

다. 중국에서는 2002년부터 2016년 말까지 40~79세 남성 61,469명을 대상으로 암 발생률과 사망률을 추적하였다. 15년 이상의 추적 조사 기간에 폐암 1,145건, 위암 656건, 간암 445건, 신장암 243건, 백혈병 100건, 림프종 124건, 골수종 46건이 발생하였다. 벤젠 누적 노출수준과 연관을 분석한 결과, 벤젠 누적 노출수준이 550mg/m³-year(예: 80번째 백분위수)를 초과한 남성은 백혈병 발생 위험이 2.3배(HR=2.3, 95% 신뢰구간=1.1~4.5), 폐암 위험은 20% 증가(HR=1.2, 95% 신뢰구간=1.0~1.6), 위암 위험은 40% 증가(HR=1.4, 95% 신뢰구간=1.0~1.9)한 것으로 보고하였다(DeMoulin et al., 2024). 단, 누적 노출수준은 잠복기와 임계 노출 기간을 고려하지 않아 잠재적으로 위험을 과대평가하거나 잘못 해석할 수 있다(Checkoway et al., 2007).

누적 노출수준 지표는 이상적이지만, 정량적 노출수준을 활용할 기회는 매우 드물다. 특정 노동자 그룹별로 대표적인 개별 유해 인자의 농도를 일정 기간 측정하고 보관하는 것은 매우 어렵다. 정량적인 측정이 어려운 유해 인자와 복합 유해 인자 노출 환경도 매우 많다. 후향적 직업 역학연구에서는 대부분 정량적 유해 인자의 노출수준을 간접적으로 대변할 수 있는 정성적인 단일 노출 변수로 직무 정보를 사용한다. 예를 들어 용접공, 도장공, 실험실 화학분석원과 같은 직무 그룹은 해당 직무에서 발생하는 특정 화학물질, 금속 흡, 분진, 소음 등에 지속적으로 노출될 가능성이 높다. 과거 자료가 부족하거나 측정이 어려운 경우, 직무 변수를 기반으로 JEM을 만들면 직무 자체가 노출 정도를 추정하는 핵심 지표가 될 수 있다. 다만, 같은 직무라도 산업별, 기업별 작업환경, 개선 수준, 작업 습관 등에 따라 실제 노출수준이 달라질 수 있다는 한계점이 있다.

우리나라에서는 박동욱 등(2013)이 국내에서 보고된 논문 등 문헌자료에서 보고된 공기 중 벤젠 노출수준을 산업, 과거 시기, 직무 등 JEM별로 통합하였다(Park et al., 2015). 이 결과는 유사한 시기에 유사한 직무를 수행한 노동자 중 혈액암 발병자의 직업병 신청 사례의 과거 노출 자료로 활용되고 있다. 우리나라는 직업, 직무에 대한 표준 분류체계는 있지만, 공중보건은 물론 직업병 감시체계에 활용한 연구는 없다. 박동욱 등은 공중보건은 물론 직업병 감시체계를 갖추기 위하여 표준 직업 분류체계를 갖출 것을 권장하였다(Park et al., 2013). 최상준 등은 우리나라 작업환경측정 자료인 국가 자료(K2B) 중 업종, 공정, 직무 등에 대한 작업환경 측정 정보를 표준화하여 국가 노출 감시체제로 활용할 방안을 제안하였다(Choi et al., 2019). JEM은 후향적 직업 역학연구에서 직접적인 노출 측정 자료가 없을 경우 화학물질이나 기타 위험에 대한 직업적 노출을 추정하고 비교하는 데 도움이 된다. 이때 JEM의 정확성은 직업분류의 정밀도에 크게 의존하며, 각 직무가 유해 인자 노출 패턴과 어떻게 연결되는지를 명확히 반영해야 한다. 따라서 직업분류 체계의 일관성과 노출 자료의 품질 확보는 JEM의 신뢰도와 분석 결과의 타당성을 결정짓는 핵심 요소이다. JEM은 비용효율적이고 대규모 분석에 적합한 반면, 연구 대상 노동자 개인 수준의 작업 특성과 시간에 따른 노출 변화, 실제 환경 내 다양성을 반영하기 어렵다는 한계가 있어 분류 오류로 인한 위험도 과소 추정을 고려해야 한다(Table 5).

본 연구는 직업 역학연구에서 노동자 집단의 과거 유해 인자 노출 변수의 장점, 한계점 등을 서술적 고찰로 정리한 연구이다. 질병의 원인과의 연관성을 규명하기 위한 후향적 직업 역학연구에서 활용되는 노출 변수는

정성적인 특성을 보여 체계적 고찰(systematic review)이나 정량적 분석(meta-analysis)을 활용할 수 없었다. 또한 문헌 선정과 내용 요약이 연구자의 주관적 판단에 의존했다는 점에서 객관성과 재현성에 한계를 지닐 수 있다. 과거 노출 변수에 대한 검색 전략이나 선정 기준 없이 저자의 경험, 전문성과 판단에 따라 주제를 정리하고 요약함으로써 과거 노출 변수의 활용에 대한 편향(bias)의 위험도 있다. 본 연구 결과는 노출평가 전문가, 연구 대상 질병의 종류, 역학연구 방법 등에 따라 과거 노출 변수를 확보하고 활용하는 데 도움이 될 것으로 판단한다.

V. 결 론

본 연구는 후향적 직업 역학연구에서 활용되는 다양한 과거 노출 변수를 비교·정리하고, 각 변수의 특성과 장단점을 서술적으로 고찰하였다. 노출변수는 조사 또는 연구 범위, 노출 정보의 활용 가능성, 노출평가 대상 집단 규모 등에 따라 단독 또는 결합해서 사용한다. 노출평가 대상 집단을 노출특성에 따라, 같은 그룹은 노출특성을 유사하게 그리고 그룹간은 서로 다르게 분류하여 노출분류 오류를 최대한 줄이는 것이 가장 중요하다. JEM은 정성적 노출 변수로서 정량적 자료의 한계를 보완하고 직무 기반 노출 정보를 통합하여 노출 변수로 유용하게 활용될 수 있다. 본 연구는 노출 기간과 직무 정보를 결합한 JEM 기반 노출 변수가 질병과 직업적 요인의 연관성을 규명하는 후향적 직업 역학연구에서 효과적으로 활용될 수 있음을 강조하였다. 본 연구의 결과는 향후 역학연구에서 과거 노출평가 전략을 수립하는 데 유용한 근거 자료를 제공할 수 있다고 판단한다.

감사의 글

이 논문은 2024~2025년도 한국방송통신대학교 지원을 받아 작성된 것으로 이에 감사를 드립니다.

References

Baumeister RF, Leary MR. Writing narrative literature reviews. *Review of general psychology* 1997; 1(3):311-20 (<https://doi.org/10.1037/1089-2680>).

1.3.311)

Beard JD, Greenhalgh MG, Hawkes E, Jones BM, Hamner SC, Thygeson SM. Development of a job-exposure matrix-like exposure assessment method for the US general population based on Occupational Information Network (O* NET) job tasks. *Annals of Work Exposures and Health* 2024;68(2):155-69 (<https://doi.org/10.1093/annweh/wxad076>)

Boffetta P, Autier P, Boniol M, Boyle P, Hill C, Aurenco A, et al. An estimate of cancers attributable to occupational exposures in France. *Journal of occupational and environmental medicine* 2010; 52(4):399-406 (<https://doi.org/10.1097/JOM.0b013e3181d5e355>)

Canada. National Occupational Classification. 2025 [Accessed 2025 Aug. 15]; Available from: <https://noc.esdc.gc.ca/?GoCTemplateCulture=en-CA>

Checkoway H, Pearce N, Kriebel D. Selecting appropriate study designs to address specific research questions in occupational epidemiology. *Occupational and environmental medicine* 2007;64(9):633-8 (<https://doi.org/10.1136/oem.2006.029967>)

Choi S, Jeong JY, Im S, Lim D, Koh D-H, Park D, et al. Standardization of work environment measurement information for constructing exposure surveillance system. *Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene* 2019;29(3):322-35 (<https://doi.org/10.15269/JKSOEH.2019.29.3.322>)

DeMoulin D, Cai H, Vermeulen R, Zheng W, Lipworth L, Shu X-O. Occupational benzene exposure and cancer risk among Chinese men: a report from the Shanghai Men's Health Study. *Cancer Epidemiology, Biomarkers & Prevention* 2024;33(11):1465-74 (<https://doi.org/10.1158/1055-9965.EPI-24-0325>)

EC. European Skills, Competences, Qualifications and Occupations (ESCO). 2025 [Accessed 2025 Aug. 15]; Available from: <https://esco.ec.europa.eu/en>

EPRS. At a glance: Euro 7 motor vehicle emission standards 2023 [Accessed 2025 Aug 15]; Available from: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2023/754573/EPRS_ATA\(2023\)754573_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2023/754573/EPRS_ATA(2023)754573_EN.pdf)

Evanoff B, Zeringue A, Franzblau A, Dale AM. Using job-title-based physical exposures from O* NET in an epidemiological study of carpal tunnel syndrome. *Human factors* 2014;56(1):166-77 (<https://doi.org/10.1177/001872081349656>)

Felletto E, Kovalevskiy EV, Schonfeld SJ, Moissonnier M, Olsson A, Kashanskiy SV, et al. Developing a

- company-specific job exposure matrix for the Asbest Chrysotile Cohort Study. *Occupational and Environmental Medicine* 2022;79(5):339-46 (<https://doi.org/10.1136/oemed-2021-107438>)
- Kauppinen T, Toikkanen J, Pukkala E. From cross-tabulations to multipurpose exposure information systems: a new job-exposure matrix. *American journal of industrial medicine* 1998;33(4):409-17 ([https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0274\(199804\)33:4<3C409::AID-AJIM12%3E3.0.CO;2-2](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0274(199804)33:4<3C409::AID-AJIM12%3E3.0.CO;2-2))
- KOSTAT. Korean Standard Classification of Occupations (KSCO). 2025 [Accessed 2025 Aug. 15]; Available from: https://kssc.kostat.go.kr:8443/ksscNew_web/ekssc/main/main.do
- Lau F, Kuziemy C. Handbook of eHealth evaluation: an evidence-based approach 2016
- Lillienberg L, Andersson E, Janson C, Dahlman-Höglund A, Forsberg B, Holm M, et al. Occupational exposure and new-onset asthma in a population-based study in Northern Europe (RHINE). *Annals of occupational hygiene* 2013;57(4):482-92 (<https://doi.org/10.1093/annhyg/mes083>)
- Morton J, Sams C, Leese E, Garner F, Iqbal S, Jones K. Biological monitoring: evidence for reductions in occupational exposure and risk. *Frontiers in Toxicology* 2022;4:836567 (<https://doi.org/10.3389/ftox.2022.836567>)
- ONET. Occupational Information Network (O*NET) Database. 2025 [Accessed 2025 Aug. 15]; Available from: <https://www.onetcenter.org/>
- Park D-U, Zoh KE, Lee Y-K, Seo H, Choi S, Koh D-H, et al. Management and collection of occupational data for health (ODH) in national public health statistics: evaluation and recommendations for Korea. *Safety and Health at Work* 2025;16(1):60-8 (<https://doi.org/10.1016/j.shaw.2024.11.006>)
- Park D, Choi S, Byun H, Kim Y, Kim S, Ha K, et al. Comprehensive review of standard occupational classification (SOC) as used in health field. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2013;23(1):11-9
- Park D, Choi S, Ha K, Jung H, Yoon C, Koh D-H, et al. Estimating benzene exposure level over time and by industry type through a review of literature on Korea. *Safety and Health at Work* 2015;6(3):174-83 (<https://doi.org/10.1016/j.shaw.2015.07.007>)
- Pukkala E, Martinsen JI, Lynge E, Gunnarsdottir HK, Sparén P, Tryggvadottir L, et al. Occupation and cancer-follow-up of 15 million people in five Nordic countries. *Acta oncologica* 2009;48(5):646-790 (<https://doi.org/10.1080/02841860902913546>)
- Purdue MP, Hutchings SJ, Rushton L, Silverman DT. The proportion of cancer attributable to occupational exposures. *Annals of epidemiology* 2015;25(3):188-92 (<https://doi.org/10.1016/j.annepidem.2014.11.009>)
- Xu M, Ho V, Lavoue J, Richardson L, Siemiatycki J. Concordance of occupational exposure assessment between the Canadian job-exposure matrix (CANJEM) and expert assessment of jobs held by women. *Annals of Work Exposures and Health* 2022;66(6):728-40 (<https://doi.org/10.1093/annweh/wxac008>)

<저자정보>

박동욱(교수), 이승희(조교), 조경이(박사수료)