

# 전통적 산업 환경을 넘어서는 직업군 간 벤젠 관련 생체 지표 수준의 차이: 국민환경보건기초조사 (2015–2023) 분석 결과

[한국 인구집단의 직업군별 벤젠 노출 생체 지표 분포]

## 요약문

**배경:** 벤젠은 IARC 1 군 발암물질이며, 소변 trans, trans-뮤콘산(UttMA)은 벤젠 노출의 핵심 생체 지표이다. 한국 일부 직업군에서 일반 환경 노출 수준을 넘어서는 높은 체내 벤젠 부담이 존재하는지 흡연 보정 생체 지표를 이용한 전국 단위 분석으로 체계적으로 평가된 바 없다.

**방법:** 국민환경보건기초조사(KoNEHS) 3–5 기(2015–2023) 성인 자료를 통합하였다( $N = 10,786$ ). 크레아티닌 보정 소변 ttMA (UttMACr)를 9 개 직업군에 걸쳐 복합표본 일반선형모형으로 분석하였으며, 흡연은 설문 기반 변수 및 5 단계 크레아티닌 보정 소변 코티닌 (COTCr)으로 보정하였다. 분산분해를 통해 각 예측변수의 기여도를 정량화하였고, COTCr 층화 분석 및 경제활동 인구(economically active population)만을 한정하여 민감도 분석을 하였다.

**결과:** 인구집단 UttMACr의 기하평균(GM)은 3기에서 5기 사이에 51% 감소하였으며, 시간 추이, 흡연, 인구통계학적 변수 및 생활습관 공변량을 보정 후에도 직업군은 유의한 독립 예측변수로 유지되었다( $\Delta R^2 = 0.0018$ ,  $p = 0.003$ ). 청소·경비·단순노무직에서 기하평균비(GMR)가 가장 높았고( $GMR = 1.13$ ,  $p < 0.001$ ), 음식·섬유·기타 제조업( $GMR = 1.12$ ,  $p < 0.05$ ), 화학·금속·기계 제조업( $GMR = 1.08$ ,  $p < 0.05$ )이 뒤를 이었다. COTCr 층화 분석에서는 통합 모형에서 명확하지 않던 직업별 패턴이 드러났다: COTCr  $\leq 1.0 \mu\text{g/g creatinine}$  군에서 건설/광업( $GMR = 1.62$ ,  $p < 0.001$ ) 및 농림어업( $GMR = 1.41$ ,  $p < 0.01$ )이 뚜렷한 상승을 보였다.

**결론:** 시간에 따라 UttMACr는 뚜렷이 감소하였으나, 흡연, 시간 추이, 인구통계학적 요인 보정 후에도 직업군 간 차이는 지속되었다. 이 결과는 직업적 벤젠 노출이 전통적으로 인지된 산업 환경을 넘어 존재할 가능성을 시사하며, 현행 감시 프로그램에서 우선순위에 포함되지 않는 노동자 집단에 대한 보다 표적화 된 생체 모니터링의 필요성을 뒷받침한다.

**주제어:** 벤젠; 직업 노출; 생물학적 모니터링; 트랜스, 트랜스-뮤콘산; 코티닌

## 배경

벤젠은 IARC 에 의해 1 군 인체 발암물질로 분류되며, 만성 노출은 조혈기계 악성종양과 관련된다[1,2]. 한국에서 벤젠에 대한 작업환경 노출 기준은 지속적으로 강화되어 왔다. **8 시간 시간가중 평균(TWA)은 1986 년 10 ppm 으로 설정된 이후 2003 년 1 ppm( $3,190 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )으로 낮아졌고, 2016 년에는 0.5 ppm 으로 추가 강화되었으며, 단시간 노출 기준(STEL)은 2007 년 5 ppm 으로 도입되어 2016 년 2.5 ppm 으로 강화되었다 [3-6]. 환경분야에서는 2006 년 말 유럽 기준을 참고하여 벤젠의 대기중 농도 기준이  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.00157 ppm)으로 설정되었고, 모니터링 인프라가 확충되면서 2010 년부터 본격 시행되었다 [7]. 이러한 규제 강화에도 불구하고 벤젠 노출은 산업·지역사회 환경 모두에서 여전히 주요 관심사이다. 석유화학 단지가 위치한 도시에서는 일부 지점에서 환경 기준을 초과하는 대기 벤젠 농도가 보고되고 있으며 [8,9], 석유화학 시설의 정기 정비(turnaround) 작업 시 노동자에서 직업적 노출 기준을 초과하였다는 보고도 있다 [10,11].**

또 다른 문제는 벤젠 함유 제품임이 표시되지 않은 제품에 함유된 숨겨진 벤젠 오염이다. **톨루엔, 자일렌, 에틸벤젠, 스티렌 등을 다양한 비율로 혼합한 석유계 페인트 희석제 및 세정제의 물질안전보건자료(MSDS)는 벤젠이 없다고 기재하는 경우가 많지만, 일부 제품에서 측정 가능한 벤젠 오염이 확인되었다 [12,13]. 그 결과, 석유계 세정 제품이나 관련 용제를 다루는 노동자는 통상적인 유해물질 소통 체계에 명시되지 않은 벤젠에 노출될 수 있다.**

벤젠 노출은 담배 연기, 자동차 배기, 실내 연소, 산업 배출, 소비재 증기 등 직업적, 비직업적 경로를 통해 발생한다 [14,15]. **소변 ttMA(UttMA)는 널리 사용되는 벤젠 노출 생체 지표로, 반감기가 약 5 시간이다 [16]. 저노출 수준에서 식이 소르빈산이 UttMA 를 상당히 증가시킬 수 있어 S-페닐메르캅투르산(SPMA)에 비해 특이도가 낮다 [17-19]. 이러한 한계에도 불구하고 UttMA 는 국민환경보건기초조사를 포함한 국가 생체 모니터링 프로그램에서 역사적으로 사용되어 왔다는 이유로 본 연구의 생체 지표로 선정하였다. 따라서 UttMA 기반 분석에서는 흡연 및 기타 잠재적 배경 노출원에 대한 세심한 주의가 필요하다.**

KoNEHS 는 환경보건법 제 14 조에 따라 2009 년부터 3 년마다 실시되는 법정 전국 생체 모니터링 프로그램이다 [20]. KoNEHS 자료는 한국 일반 인구집단의 소변 벤젠 대사체 수준을

기술하고, 일부 건강 결과와의 연관성을 분석하는 데 활용되어 왔다 [21,22]. 그러나 흡연과 시간 추이를 엄격히 보정한 후 벤젠 관련 생체 지표 수준이 직업군에 따라 차이를 보이는지를 직접 분석한 KoNEHS 연구는 아직 발표되지 않았다. 이에 본 연구는 직업군 간 UttMA 수준을 비교하고, 배경 환경 노출을 넘어 직업 요인이 체내 벤젠 노출에 기여하는 정도를 추정하고자 하였다. 이 탐색적 분석은 흡연 및 시간 추이에 기인하는 변이를 넘어서 직업군 간에 소변 벤젠 생체 지표 수준의 체계적 차이가 존재하는지를 확인하고자 한다.

## 방법

### 윤리 선언

본 이차 분석은 국립환경과학원(NIER)이 제공한 익명화된 KoNEHS 자료를 사용하였다. 5 기 자료 접근은 NIER 자료 이용 승인(NIER-2021-01-01-013) 하에 승인되었으며, 이전 기수 자료는 공개 자료로 사용하였다.

### 연구 설계 및 참여자

3 기(2015–2017;  $n = 3,787$ ), 4 기(2018–2020;  $n = 4,239$ ), 5 기(2021–2023;  $n = 4,279$ ) 자료를 통합하여 19 세 이상 성인 총 12,305 명의 자료를 구성하였다. 각 기수는 행정구역과 지역 유형(도시·농촌·해안)으로 층화 된 인구 비례 2 단계 확률집락 표본추출 설계를 사용하여 전국 대표성을 확보하였다. 참여자들은 현장 채뇨 및 채혈을 실시하고 인구통계학적, 생활습관, 거주 환경, 식이 습관에 관한 면접 설문을 완료하였다. 직업군 간 비교에 집중하기 위해 학생 및 군인은 제외하였으며, WHO 유효 범위( $0.3\text{--}3.0\text{ g/L}$ )를 벗어난 소변 크레아티닌 농도를 보인 참여자도 극단적 희석 또는 농축으로 인한 왜곡을 줄이기 위해 제외하였다 [23]. 최종 분석 표본은 10,786 명이다.

### 직업 분류

직업은 한국표준직업분류(KSCO) 2 자리 중분류 기준으로 구분하였다. 조사 기수 간 코드를 통일하기 위해 3 기에 사용된 KSCO 6 차 개정 코드를 4·5 기에 사용된 7 차 개정 코드로

대응시켰으며, 총 44 개 중분류 코드를 일치시켰다 [24]. 분석을 위해 벤젠 관련 잠재 노출 가능성과 표본 크기를 고려하여 사전 정의된 9 개 범주로 재편하였다: (A) 주부/무직(참조군, reference group), (B) 농림어업, (C) 서비스/판매, (D) 관리자/전문가/사무직, (E) 운전·운송, (F) 화학·금속·기계 제조업, (G) 음식·섬유·기타 제조업, (H) 건설·광업 (I) 단순노무직(청소 및 경비 포함). 분류 세부 사항은 Table 1 각주 및 보조 Table S2 에 제시하였다.

주부/무직 군을 참조군으로 지정한 것은 이 집단이 직업적 화학 노출 가능성이 가장 낮으며 일반 환경 배경 노출 수준에 가장 근접하기 때문이다. 이 군이 벤젠 노출로부터 완전히 자유로운 것은 아니지만(예: 가정용 세정제), 일반 인구 조사에서 이용 가능한 가장 낮은 노출 기준선을 나타낸다. 결과의 견고성을 검증하기 위해 경제활동 인구를 대상으로 농림어업군을 참조군으로 한 이차 분석도 실시하였다(Table 3).

## 결과 변수 및 공변량

일차 결과 변수는 크레아티닌 보정 소변 trans, trans-뮤콘산의 자연로그값 (LogUttMACr;  $\mu\text{g/g creatinine}$ )이다. 현장 소변의 농도는 소변 희석 정도에 영향을 받으므로 표준 생체 모니터링 관행 및 KoNEHS 보고 관례에 따라 크레아티닌으로 보정하였다. 공변량은 Table 2 각주에 상세히 기술하였으며, 거주 지역, 교통 노출 점수, 성별, 연령, 교육 수준, 월 가구 소득, 음주, 규칙적 운동, 구이류(육류·생선) 섭취 빈도를 포함하였다.

흡연 관련 보정에는 현재 흡연 여부와 간접흡연 노출 빈도 및 크레아티닌 보정 소변 코티닌(COTCr)이 포함되었다. COTCr 는 5 단계 순서형 변수로 모형화하였다. 잠재적 잔류 흡연 교란을 줄이기 위해  $\text{COTCr} \leq 1.0 \mu\text{g/g creatinine}$  을 참조 범주로 설정하고 상위 값은 백분위수 기반으로 범주화하였다(1-50, 51-75, 76-95, >95 백분위수). 설문 기반 및 생체 지표 기반 흡연 지표를 함께 사용한 것은 자기보고만으로는 충분히 포착되지 않는 능동 흡연, 간접 흡연, 낮은 수준의 니코틴 노출에 의한 잔류 교란을 줄이기 위함이다 [25-27].

KoNEHS 는 농촌·해안 지역을 과대 포집하는 거주지 기반 층화표본추출 설계를 사용한다. KoNEHS 표본 추출이 직업이 아닌 거주지를 기준으로 하기 때문에, 표본 가중치를 적용하더라도 직업별 가중 인구 분포가 전국 노동력 구조와 다를 수 있다. 따라서 직업별 가중 비율을 전국 노동력 구조로 해석하지 않아야 한다.

## 통합 전략: 가중치 조정 및 고유 표본 식별자

모든 분석은 SPSS 29 (IBM Corp.)의 복합표본 모듈에서 층·일차 추출 단위, 가중치를 지정하여 복합표본 설계를 반영하였다. KoNEHS 기수 통합의 주요 과제는 3기가 평균 약 1.0의 표준화 상대 가중치를 사용한 반면, 4·5기는 훨씬 큰 수치의 인구 추정 가중치를 사용한 것이었다. 기수 간 기여도를 균형 있게 반영하기 위해 각 기수 내에서 가중치의 평균이 1.0이 되도록 재조정하였으며, 이를 통해 통합 분석이 비교 불가능한 목표 인구 규모가 아닌 기수 표본 크기를 반영하도록 하였다.

각 KoNEHS 기수는 독립적 표본 프레임을 사용하며 유사한 층 또는 집락 코드가 반복될 수 있으므로, 통합 전 층과 일차 추출 단위에 기수 고유 식별자를 생성하였다. 이 단계는 기수 간 집락의 인위적 병합을 방지하여 표준오차 과소 추정 및 통계적 유의성 과장을 막는다.

## 통계 분석

UttMACr의 가중 산술평균과 표준편차, 기하평균(GM)과 기하표준편차(GSD)를 직업군 및 참여자 특성별로 산출하였다. **UttMACr의 가중 백분위 분포는 조사 기수, 성별, 취업 여부, 흡연 상태별로도 산출하였다(추가보조 Table S3).** 이 분포는 코티닌 기반 흡연 범주 (비흡연자, 수동흡연자, 능동흡연자 구분)로 층화되어, 흡연에 의한 배경 노출을 감안한 직업 현장 벤젠 생체 지표 수준 비교의 기준 값으로 활용될 수 있다. LogUttMACr를 종속 변수로 하는 복합표본 일반선형모형 시퀀스를 적합하였다(Table 2). 지수 변환한 회귀 계수는 기하평균비(GMR)로 제시하며, 대조군(reference group) 대비 각 직업군의 GM UttMACr 비율로 해석된다. 모형 순서는 다음 순서로 계산하였다: M1 직업군만 포함, M2 조사 기수 추가, M3 거주 지역 추가, M4 직업군+기수+지역, M5 인구통계학적·생활습관·교통 노출 공변량 추가, M6 M4에 흡연 변수 추가, M7은 모든 공변량 포함한 경우이다.

직업군이 설명 분산에 기여하는 증분은 전체 모형과 직업군 지시변수를 제외한 모형을 비교하여 추정하였다. 예측변수 블록의 상대적 기여도를 정량화 하기 위해 순차적 모형 위계에 걸쳐 가중  $R^2$  변화량을 산출하였다. 세 가지 흡연 관련 공변량은 담배 관련 교란을 최대한 통제하기 위해 동시에 투입하였다. 자기보고식 흡연 여부와 COTCr은 설계에 따라 상관관계가 있지만(Cramér  $V = 0.86$ ), 분산 팽창인수는 모두 5 미만이었고 조건수는 14.8로 다중공선성

문제가 없었다(Table 2). 두 가지 민감도 분석을 실시하였다. 비취업자 포함이 직업별 대비에 미치는 영향을 평가하기 위해 농림어업군을 참조로 경제활동 인구에 한정하여 전체 모형을 반복하였다(Table 3). 흡연에 의한 잔류 교란을 추가로 검토하기 위해 COTCr 수준으로 전체 모형을 층화( $\leq 1.0$  vs.  $> 1.0$   $\mu\text{g/g Cr}$ )하여 흡연 강도의 객관적 측정치 안에서 직업별 대비를 살펴보았다(Table 4).

## 결과

### 참여자 특성

Table 1 은 9 개 직업군에 걸친 10,786 명의 특성을 요약한다. UttMACr GM 은 건설/광업(79.6  $\mu\text{g/g Cr}$ ), 화학·금속·기계 제조업(78.5  $\mu\text{g/g Cr}$ ), 음식·섬유·기타 제조업(77.9  $\mu\text{g/g Cr}$ ) 순으로 높았고, 농림어업(64.5  $\mu\text{g/g Cr}$ )이 가장 낮았다. 조사 기수(cycle)에 따른 뚜렷한 시간적 감소가 관찰되었다. 인구집단 기하평균(UttMACr GM)은 3 기 108.0  $\mu\text{g/g Cr}$  에서 4 기 65.1  $\mu\text{g/g Cr}$ , 5 기 51.3  $\mu\text{g/g Cr}$  으로 감소하였으며, 이 경향은 모든 직업군에서 대체로 일관되었다. 현재 흡연율은 주부/무직군(11.4%)에서 가장 낮고 건설/광업(42.5%)에서 가장 높았다.

### 단계적 회귀 분석 및 분산 분해

Table 2 에 단계적 모형 결과를 제시하였다. 보정하지 않은 모형(M1)에서 6 개 직업군이 주부/무직의 대조군 대비 유의하게 높은 GMR 을 보였다. 조사 기수 추가(M2)로 설명 분산이 가장 크게 증가하였으며( $\Delta R^2 = 0.1163$ ), 이는 시간 추세가 UttMACr 변동의 주요 예측 변수임을 나타낸다. 흡연 관련 변수만 보정(M6)한 경우 몇 가지 기본적인 직업 간 차이가 상당히 약화되었다. 예를 들어 운전·운송직의 GMR 은 1.10 에서 0.97 로, 건설/광업은 1.15 에서 1.00 으로, 화학·금속·기계 제조업은 1.11 에서 0.99 로 감소하였는데, 이는 이 직업군들의 보정 전(crude) 상승 일부가 직업 자체보다 흡연률 차이에 기인함을 시사한다.

완전 보정 모형(M7)에서 3 개 직업군이 유의하게 상승한 채로 유지되었다: 청소/경비, 단순노무직(GMR 1.13,  $p < 0.001$ ), 음식·섬유·기타 제조업(GMR 1.12,  $p < 0.05$ ), 화학·금속·기계

제조업(GMR 1.08,  $p < 0.05$ ). 직업군의 설명 분산 증분은 작지만 통계적으로 유의하였다( $\Delta R^2 = 0.0018$ ;  $F(8, 10745) = 2.976$ ,  $p = 0.0025$ ).

## 전체 모형 공변량 및 경제활동 인구 분석

Table 3 에서 전체 모형 공변량 추정치를 제시하였다. 3 기 대비 4 기는 GM 이 39.5% 낮았고(GMR 0.605,  $p < 0.001$ ), 5 기는 51.0% 낮았다(GMR 0.490,  $p < 0.001$ ). 현재 흡연은 UttMACr 28.6% 상승과 관련되었고(GMR=1.286), COTCr 최고 범주(>95 백분위)는 70.1% 상승과 관련되어(GMR = 1.701) 강한 용량-반응 관계를 나타냈다. 여성이 남성보다 높았고(GMR 1.243,  $p < 0.001$ ), 농촌 거주는 도시 대비 약간 낮은 수준과 관련되었다(GMR 0.931,  $p < 0.01$ ). 경제활동 인구 분석에서 농림어업을 대조군으로 한 경우 청소/경비/단순노무직만 유의하게 높은 상승을 보였으며(GMR 1.124,  $p < 0.05$ ), 전체 인구 모형과 경제활동 인구 모형의 결과가 대체로 일치하여 주요 추론이 비취업자 포함에만 의존하지 않음을 확인하였다.

## 코티닌 총화 분석

Table 4 에 제시된 코티닌 총화 분석 결과, 통합 모형에서는 명확하지 않던 직업별 대비가 드러났다. COTCr  $\leq 1.0$   $\mu\text{g/g creatinine}$  군에서는 건설/광업이 연구 내 최대 상승을 보였고(GMR 1.62,  $p < 0.001$ ), 농림어업(GMR 1.41,  $p < 0.01$ ), 음식·섬유·기타 제조업(GMR 1.36,  $p < 0.05$ )이 뒤를 이었다. COTCr  $> 1.0$   $\mu\text{g/g creatinine}$  군에서는 청소/경비, 단순노무직만 유의하게 상승하였다(GMR 1.12,  $p < 0.01$ ). 이 결과는 담배 연기 관련 배경 노출이 다변량 보정 후에도 완전한 직업별 생체 지표 차이를 가릴 수 있음을 시사한다.

## 위계적 분산 분해

Table 5 에 제시된 사전에 설정된 순차 투입 순서에 따라 예측변수 기여도를 분할한 결과, **총 모형  $R^2(0.178)$  중 조사 기수가 가장 큰 비중을 차지하였다( $\Delta R^2 = 0.1163$ , 총  $R^2$ 의 65.3%).** 다음으로 흡연 관련 변수가 25.5%, 인구통계학적, 생활습관, 교통 노출 변수가 6.1%, 거주 지역이 0.6%, 직업의 고유 기여가 1.0%를 각각 차지하였다. 보정 전 직업  $R^2(M1: 0.0044, 2.5\%)$ 는 완전 보정 후 1.0%로 감소했는데, 이는 직업의 원시적 효과 중 약 60%가 흡연 및 기타 상관 요인에

의해 교란되었음을 의미한다. 그럼에도 보정된 직업  $\Delta R^2$ 는 유의한 상태를 유지하였으며 ( $p=0.003$ ), 이는 측정된 모든 교란 변수를 통제한 후에도 직업군이 UttMACr 변동과 독립적으로 관련됨을 확인한다. 전체 설명되지 않는 분산은 82.2%로, 개인 대사 변이 및 식이 소르빈산 섭취 등 미측정 요인 등을 반영한다.

## 고찰

### 주요 소견 개요

2015–2023 년 KoNEHS 통합 자료를 이용한 본 연구에서 UttMACr 는 시간에 따라 한국 성인 인구집단에서 실질적으로 감소하였으나, 시간 추이, 흡연, 사회인구학적 공변량 보정 후에도 직업군 간 차이는 지속되었다. 가장 일관된 상승은 청소/경비/단순노무직에서 관찰되었으며, 코티닌 증화 분석에서는 비흡연 건설/광업 및 농림어업 참여자에서도 주목할 만한 상승이 추가로 확인되었다.

### 청소/경비/단순노무직: 일관되게 상승한 집단

본 연구에서 가장 일관된 신호는 청소/경비, 단순노무직의 상승이었다. 이 집단은 완전 보정 모형과 경제활동 인구 분석 모두에서 상승한 채로 유지되었고, 증화 분석에서  $COTCr > 1.0 \mu g/g$  creatinine 군에서도 상승하여 흡연 영향을 가장 엄격하게 통제한 분석에서도 이 신호가 유지되었다. 절대적 상승 크기는 완만하지만, 여러 분석 접근법에 걸친 일관성은 이 집단이 배경 수준을 넘는 지속적 벤젠 관련 노출을 경험할 가능성을 뒷받침한다. 이들은 석유계 세정제, 용제 함유 제품, 건물 유지관리 자재에서 비롯된 벤젠 관련 노출에 접할 수 있다. 13%의 상대적 상승은 완만하나, 그 일관성은 우연한 발견이 아니라 반복적 노출을 시사한다. ttMA 는 최근 노출을 반영하므로 현재 자료로는 누적 용량이나 장기적 지속성을 확인할 수 없으며, 만성 노출 패턴을 확인하려면 개인 수준의 종단 자료가 필요하다. 이 소견은 의미 있는 직업적 벤젠 노출이 한국에서 중공업·석유화학 환경에 국한된다는 기존 가정에 이의를 제기하며 [12,13], 현행 한국 산업보건 규정상 벤젠에 대한 의무적 작업환경 측정(WEM) 대상에서 제외될 가능성이 높은 이 집단이 현행 감시 체계에서 간과될 수 있음을 시사한다.

청소/경비, 단순노무직의 상승은 여러 잠재 기전을 통해 해석할 수 있다. 첫째, 석유계 세정제, 주차장 내 공회전 차량, 잔류 실내 공기 오염 등을 통한 직접적 화학 노출이 가능하다. 둘째, 이 소견은 직업적 취약성에 관련된 간접 노출 경로 — 환기 불량 작업장의 환경 담배 연기, 교통 및 산업 배출원 인근 거주, 이 집단에서 흔히 관찰되는 비공식적 다중 직업 보유 — 를 반영할 수 있다. 두 가지 해석 모두 현시점에서는 추정적이며, 직무 단위의 노출 평가를 포함한 표적화 된 후속 연구를 통해서만 어떤 기전이 관찰된 상승에 기여하는지 명확히 할 수 있다.

## 시간적 감소와 그 해석

보정 전(crude) 인구집단 GM은 3기 108.0  $\mu\text{g/g Cr}$ 에서 5기 51.3  $\mu\text{g/g Cr}$ 로 약 52.5% 감소하였다. 이 감소는 연료 및 자동차 배기 규제 강화, 대기질 관리 확대, 직업적 벤젠 노출 기준 강화 등 복합적 변화를 반영할 가능성이 높다 [4,28,29]. 이러한 전반적 감소에도 불구하고 직업별 상대적 차이가 지속된 것은 전체 인구 노출이 환경 개선에 따라 감소하는 상황에서도 일부 직업 관련 노출원이 남아 있음을 시사한다. 분석적 관점에서, 조사 기수가 가장 큰 분산 비중을 설명하므로 기수 보정 없이 복수의 KoNEHS 기수를 통합하면 직업별 추정치가 오도될 수 있다.

## 흡연 교란이 직업 패턴을 가릴 수 있다

다요인 흡연 보정(흡연 여부, 간접흡연 노출, COTCr 수준)은 설명 분산의 25.5%를 차지하여, **담배 연기가 시간 추이에 이어 두 번째로 중요한 결정 요인임을 확인하였다**(Table 5). 분석의 주목할 특징은 흡연 보정이 직업별 대비를 변화시키는 정도이다(Table 4). 특히 코티닌 증화 분석에서 통합 모형에서는 명확하지 않던 일부 직업군의 현저한 상승이 드러났다. 건설/광업 근로자는 비흡연자에서 62% 상승(GMR 1.62)을 보였지만 코티닌 고수준 군에서는 효과가 없었고(GMR 1.01), 농림어업도 저코티닌 군에서만 41% 상승하였다. 담배 연기 관련 배경 노출이 완만한 직업별 신호를 압도할 수 있으며, 이는 밝은 배경(태양빛) 앞에서 적당한 광원(전구 불빛)을 감지하는 어려움에 비유할 수 있다 [28,29]. 이 결과는 흡연율이 직업군 간에 크게 다르고 생체 지표 자체가 담배 관련 노출에 민감한 경우 통상적인 회귀 보정만으로는 불충분할 수 있음을 시사한다 [30]. 저노출 수준 벤젠의 향후 생체 모니터링 연구에서 코티닌 기반 증화 또는 이에 준하는 엄격한 흡연 통제가 표준 공변량 보정의 유용한 보완책이 될 수 있다.

## 농림어업 및 건설/광업 소견

저코티닌군의 농림어업 및 건설/광업 참여자에서 관찰된 상승은 예상치 못한 결과로 신중하게 해석해야 한다. 잠재적 노출원으로는 연료 취급, 경유 배기, 바이오매스 연소, 농약 관련 용제, 현장 또는 야외 작업 중 발생하는 복합 노출 등이 있다 [31]. 본 연구의 직업군은 광범위하고 작업 수준의 노출 측정값이 없었으므로, 이러한 결과는 특정 노출원에 대한 확정적인 증거라고 하기보다는 가설 제기 정도 의견으로 해석해야 한다.

특히 비흡연자의 농림어업 상승(GMR 1.41)은 신중한 고려가 필요하다. 소변 코티닌은 최근 담배 유래 니코틴 노출을 반영하는 데 널리 사용되지만, 담배 이외의 연소 기원 노출에는 덜 민감할 수 있다. 문헌에서 제시된 후보 노출 경로로는 한국 일부 농촌에서 여전히 주거 난방 및 조리에 사용되는 바이오매스 연소, 경유 또는 가솔린 연료를 사용하는 농기계의 연소 배기, 일부 농약 제형에 포함될 수 있는 벤젠 함유 용제 캐리어 등이 있다. 이러한 노출은 코티닌만으로는 충분히 반영되지 않을 수 있다. 따라서 비흡연 농업/어업 종사자에서 나타나는 잔류 벤젠 농도 증가는 담배 이외의 환경적 및 직업적 벤젠 발생원에 부분적으로 기인할 수 있지만, 이는 여러 가능한 설명 중 하나일 뿐이며 잔류 흡연으로 인한 교란 요인에만 기인한다고 단정해서는 안 된다. 정확한 원인 규명을 위해서는 과제 수준의 노출 측정값이 필요하지만, 본 연구에서는 이를 확보할 수 없었다.

## 소규모이지만 유의한 직업 $\Delta R^2$ 의 해석

직업 관련 설명 분산 증분은  $\Delta R^2 = 0.0018$  으로 총 분산의 0.18 퍼센트포인트에 해당한다. 이  $\Delta R^2$ 는 작고 무시할 수 있어 보일 수 있지만, 연구 설계를 고려하여 해석해야 한다. KoNEHS는 직업 코호트가 아닌 일반 인구 조사로서 참여자의 36.5%가 주부/무직이며 직업군은 광범위하게 묶였다. 이러한 조건에서 실제 직업 관련 신호는 희석되기 쉽다. 그럼에도 직업군은 주요 교란 변수 통제 후 통계적으로 식별 가능한 관련성을 유지하였다. 산업안전보건법상[32] 규제 대상 유해물질에 대한 작업환경측정(WEM)은 사업장 화학물질 목록 및 안전 문서를 통해 개시되지만, 다수의 석유계 제품 MSDS는 미량 오염물로 벤젠이 존재하더라도 이를 명시하지 않을 수 있어 벤젠에 대한 작업환경측정 및 생물학적 모니터링이 실시되지 않고 해당 근로자가 비노출자로 행정 분류될 수 있다. 벤젠의 발암성을 고려할 때 완만하고 반복적인 노출 차이도 예방적 관심을

기울일 필요가 있다 [33-36].

## 강점 및 한계

본 연구의 강점은 전국 대표 대규모 생체 모니터링 자료 활용, 비교 불가한 가중치 규모를 명시적으로 처리하면서 세 기수 자료 통합, 설문 기반 및 생체 지표 기반 흡연 통제 병행, 그리고 직업의 증분 기여도를 투명하게 제시하는 순차적 모형 구성이다.

여러 한계도 인정해야 한다. 첫째, 단면 설계로 인해 직업과 노출원 간의 인과 추론이 불가하다. 둘째,식이 소르빈산 섭취를 측정하지 않아 직업군 간 미측정 식이 차이가 소르빈산에 의한 잔류 교란에 기여했을 수 있다 [17,18]. 셋째, 현장 소변 채취는 최근 노출을 반영하며 개인 내 시간적 변동성이 있다. 넷째, 광범위한 직업군 분류로 상당한 노출 오분류가 발생했을 수 있다. 다섯째, 추정적 노출원을 직접 검증할 수 있는 작업환경 측정 또는 직무 단위 자료가 없었다. 여섯째, 건강 근로자 효과로 인해 육체적으로 고된 직업에서 추정치가 귀무 방향으로 편향될 수 있다. 일곱째, 여성에서 관찰된 높은 UttMACr 는 실제 노출 차이보다는 성별 특이적 크레아티닌 배설 차이를 일부 반영할 수 있다 [37]. 향후 연구에서는 S-페닐메르캡투르산(SPMA) 등 더 특이적인 생체 지표의 동시 측정과 직업-노출 매트릭스 또는 직무 기반 노출 평가 연계가 필요하다.

## 결론

2015–2023 년 KoNEHS 통합 자료에서 UttMACr 는 시간에 따라 뚜렷이 감소하였으나, 흡연, 시간 추이, 사회인구학적 요인 보정 후에도 직업군 간 차이는 지속되었다. 청소/경비, 단순노무직에서 가장 일관된 상승이 관찰되었고, 코티닌 총화 분석에서는 비흡연 건설/광업 및 농림어업 참여자에서 추가적인 신호가 확인되었다. 코티닌 기반 흡연 상태별로 총화 된 인구집단 수준 UttMACr 백분위 분포(보조 Table S1)는 벤젠 노출 가능성이 있는 근로자의 직업적 생체 지표 수준을 일반 인구의 환경적 배경 농도와 비교하는 생물학적 모니터링 프로그램의 기준값으로 활용될 수 있다. 이 소견들은 인과관계를 증명하지는 않지만, 벤젠 관련 노출이 전통적으로 인지된 산업 환경에만 국한되지 않을 수 있음을 시사한다.

ttMA 는 흡연에 강하게 영향을 받으며 저노출 수준에서 특이도가 낮으므로, 직업적 벤젠

노출의 표적 감시에는 SPMA 등 더 특이적인 생체 지표가 더 적합할 수 있다. 현행 감시 프로그램에서 통상적으로 포착되지 않는 노동자 집단에 대한 보다 표적화된 생체 모니터링 및 노출 평가는 간과된 직업적 노출 시나리오를 발굴하는 데 기여할 것이다.

## 참고문헌

1. IARC. **Benzene IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans Vol. 120**. Lyon: IARC; 2018; <https://publications.iarc.who.int/576>
2. Yoon JH, Kwak WS, Ahn YS. **A brief review of relationship between occupational benzene exposure and hematopoietic cancer**. Ann Occup Environ Med 2018;30:33. <https://doi.org/10.1186/s40557-018-0245-9>
3. Kang SK, Lee MY, Kim TK, Lee JO, Ahn YS. **Occupational exposure to benzene in South Korea**. Chem Biol Interact 2005;153-154:65-74. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2005.03.011>
4. 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>
5. Ministry of Employment and Labor of Korea. **Permissible Exposure Limits(PELs) for chemical substances and physical agents (Labor Ministry Notification No. 2020-48, Dec 22, 1986; later revisions)**. <https://www.moel.go.kr/skin/doc.html?fn=2020011415460202ae79b648784733aac25448f202f783.hwp&rs=/viewer/BBS/2020/>. 2013. Accessed 2026.03.01.
6. Ministry of Employment and Labor of Korea. **Permissible Exposure Limits (PELs) for Hazardous Agents in Annexed Table 11-3 under Article 81-4 of Enforcement Rule of the Occupational Safety and Health Act**. <https://www.law.go.kr/lsInfoP.do?lsiSeq=187393&ancYd=20161028&ancNo=00169&efYd=20161028&nwJoYnInfo=N&efGubun=Y&chrClsCd=010202&ancYnChk=0#J8953305>. 2016. Accessed 2026.03.01.
7. Ministry of Climate Energy and Environment of Korea. **Environmental Standards: Annex 1, Article 2 of the Enforcement Decree of the Framework Act on Environmental Policy**. <https://www.law.go.kr/LSW/lsInfoP.do?lsiSeq=76291&ancYd=20061204&ancNo=19745&efYd=20070101&nwJoYnInfo=N&efGubun=Y&chrClsCd=010202&ancYnChk=0#0000>. 2007. Accessed 2026.03.01.
8. Kim AR, Bang JH, Lee S, Sim CS, Kim Y, Lee J. **Distribution of volatile organic compounds by distance from industrial complexes and potential health impact on the residents**. International Journal of Environmental Health Research 2024;34(12):4202-13. <https://doi.org/10.1080/09603123.2024.2339550>
9. Lee DK, Park JM, Jang JH, Jung JS, Kim MK, Heo JS, et al. **Spatiotemporal Assessment of Benzene Exposure Characteristics in a Petrochemical Industrial Area Using Mobile-Extraction Differential Optical Absorption Spectroscopy (Me-DOAS)**. Toxics 2025;13(8):655.

<https://doi.org/10.3390/toxics13080655>

10. Chung EK, Shin JA, Lee BK, Kwon JW, Lee NR, Chung KJ, et al. **Characteristics of occupational exposure to benzene during turnaround in the petrochemical industries.** *Safety and Health at work* 2010;1(1):51–60. <https://doi.org/10.5491/SHAW.2010.1.1.51>
11. Chung EK, Jang JK, Koh DH. **A comparison of benzene exposures in maintenance and regular works at Korean petrochemical plants.** *Journal of Chemical Health and Safety* 2017;24(3):21–6. <https://doi.org/10.1016/j.jchas.2016.09.006>
12. Choi S, Kwak S, Park D, Jeong JY. **Potential risk of benzene in petroleum-derived products used from 1974 to 2012 in Korea.** *Aerosol and Air Quality Research* 2019;19(3):548–58. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2018.08.0301>
13. Kim DY, Kim HS, Lim DS, Kim KY. **Benzene exposure assessment of printing workers treating petroleum-based cleaner in South Korea.** *Ind Health* 2023;61(4):283–90. <https://doi.org/10.2486/indhealth.2022-0103>
14. Yu R, Weisel CP. **Measurement of the urinary benzene metabolite trans, trans-muconic acid from benzene exposure in humans.** *Journal of Toxicology and Environmental Health Part A* 1996;48(5):453–4. <https://doi.org/10.1080/009841096161186>
15. Weisel CP. **Benzene exposure: an overview of monitoring methods and their findings.** *Chemico-biological interactions* 2010;184(1–2):58–66. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2009.12.030>
16. Boogaard P, Van Sittert N. **Biological monitoring of exposure to benzene: a comparison between S-phenylmercapturic acid, trans, trans-muconic acid, and phenol.** *Occupational and Environmental Medicine* 1995;52(9):611–20. <https://doi.org/10.1136/oem.52.9.611>
17. Ruppert T, Scherer G, Tricker AR, Adlkofer F. **Trans, trans-muconic acid as a biomarker of non-occupational environmental exposure to benzene.** *International archives of occupational and environmental health* 1997;69(4):247–51. <https://doi.org/10.1007/s004200050143>
18. Scherer G, Renner T, Meger M. **Analysis and evaluation of trans, trans-muconic acid as a biomarker for benzene exposure.** *Journal of Chromatography B: Biomedical Sciences and Applications* 1998;717(1–2):179–99. [https://doi.org/10.1016/S0378-4347\(98\)00065-6](https://doi.org/10.1016/S0378-4347(98)00065-6)
19. Rahimpour R, Jalilian H, Mohammadi H, Rahmani A. **Biological exposure indices of occupational exposure to benzene: A systematic review.** *Heliyon* 2023;9(11). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21576>
20. Ministry of Climate Energy and Environment of Korea. **Environmental Health Act Article 14 (Basic Investigations of National Environmental Health).** [https://elaw.klri.re.kr/eng\\_service/lawView.do?hseq=48628&lang=ENG](https://elaw.klri.re.kr/eng_service/lawView.do?hseq=48628&lang=ENG). 2008. Accessed 2026.03.01.
21. Lee SH, Kim JH, Choi YH, Kim SK, Lee K, Park JB. **A review of the literature using the Korean National Environmental Health Survey (cycle 1–3).** 2021. <https://doi.org/10.5668/JEHS.2021.47.3.227>
22. Shin SS, Yang EH, Lee HC, Moon SH, Ryoo J-H. **Association of metabolites of benzene and toluene with lipid profiles in Korean adults: Korean National Environmental Health Survey (2015–2017).** *BMC Public Health* 2022;22(1):1917. <https://doi.org/10.1186/s12889-022-14319-x>

23. World Health Organization. **Biological monitoring of chemical exposure in the workplace: guidelines**: World Health Organization; 1996; [https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/41856/WHO\\_HPR\\_OCH\\_96.1.pdf](https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/41856/WHO_HPR_OCH_96.1.pdf)
24. Ministry of Data and Statistics. **7th Revision and Notification of the Korean Standard Classification of Occupations** (Ministry of Data and Statistics Korea Notification No. 2017–191). [https://mods.go.kr/board.es?mid=a10403040000&bid=107&act=view&list\\_no=361380](https://mods.go.kr/board.es?mid=a10403040000&bid=107&act=view&list_no=361380). 2017. Accessed 2026.03.01.
25. Siegmund B, Leyden DE, Zikulnig E, Leitner E, Murkovic M, Pfannhauser W, et al. **The contribution of dietary nicotine and dietary cotinine to salivary cotinine levels as a nicotine biomarker**. Food Chemistry 2001;74(3):259–65. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(01\)00147-9](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(01)00147-9)
26. Benowitz NL, Jain S, Dempsey DA, Nardone N, Helen GS, Jacob P, 3rd. **Urine cotinine screening detects nearly ubiquitous tobacco smoke exposure in urban adolescents**. Nicotine Tob Res 2017;19(9):1048–54. <https://doi.org/10.1093/ntr/ntw390>
27. Pratt K, Hilty A, Jacob Iii P, Schick SF. **Respiratory exposure to thirdhand cigarette smoke increases concentrations of urinary metabolites of nicotine**. Nicotine and Tobacco Research 2023;25(8):1424–30. <https://doi.org/10.1093/ntr/ntad002>
28. Fustinoni S, Consonni D, Campo L, Buratti M, Colombi A, Pesatori AC, et al. **Monitoring low benzene exposure: comparative evaluation of urinary biomarkers, influence of cigarette smoking, and genetic polymorphisms**. Cancer Epidemiol Biomarkers Prev 2005;14(9):2237–44. <https://doi.org/10.1158/1055-9965.EPI-04-0798>
29. Kim S, Vermeulen R, Waidyanatha S, Johnson BA, Lan Q, Rothman N, et al. **Using urinary biomarkers to elucidate dose-related patterns of human benzene metabolism**. Carcinogenesis 2006;27(4):772–81. <https://doi.org/10.1093/carcin/bgi297>
30. Carrieri M, Tranfo G, PIGINI D, Paci E, Salamon F, Scapellato ML, et al. **Correlation between environmental and biological monitoring of exposure to benzene in petrochemical industry operators**. Toxicol Lett 2010;192(1):17–21. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2009.07.015>
31. Sabarwal A, Kumar K, Singh RP. **Hazardous effects of chemical pesticides on human health—cancer and other associated disorders**. Environmental toxicology and pharmacology 2018;63:103–14. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2018.08.018>
32. Ministry of Employment and Labor of Korea. **Chapter VIII Management of Employees' Health Occupational Safety and Health Act**. 2025. Accessed 2026.03.01.
33. Koh DH, Park JH, Lee SG, Kim HC, Jung H, Kim I, et al. **Development of Korean carcinogen exposure: assessment of the exposure intensity of carcinogens by industry**. Safety and Health at Work 2022;13(3):308–14. <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2022.05.003>
34. Koh DH, Choi S, Park JH, Lee SG, Kim HC, Kim I, et al. **Development of Korean carcinogen exposure: occupation-based exposure matrix**. Annals of Work Exposures and Health 2025;69(2):191–200. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxae090>
35. Guo H, Ahn S, Zhang L. **Benzene-associated immunosuppression and chronic inflammation in humans: a systematic review**. Occup Environ Med 2020. <https://doi.org/10.1136/oemed-2020-106517>
36. Wang T, Cao Y, Xia Z, Christiani DC, Au WW. **Review on novel toxicological effects and**

personalized health hazard in workers exposed to low doses of benzene. Arch Toxicol 2024;98(2):365–74. <https://doi.org/10.1007/s00204-023-03650-w>

37. Suwazono Y, Åkesson A, Alfven T, Järup L, Vahter M. **Creatinine versus specific gravity-adjusted urinary cadmium concentrations.** Biomarkers 2005;10(2–3):117–26. <https://doi.org/10.1080/13547500500159001>