

작업환경측정 결과를 활용한 벤젠 노출 매트릭스에 대한 연구

백경희 · 박동욱¹ · 하권철*

창원대학교 보건위생학과, ¹한국방송통신대학교 환경보건학과

Benzene Exposure Matrices Using Employees's Exposure Assessment Data

Kyunghee Baek · Donguk Park¹ · Kwonchul Ha*

Department of Biochemistry and Health Science, Changwon National University

¹Department of Environmental Health, Korea National Open University

ABSTRACT

Objectives: The aims of this study were to set up benzene exposure matrices according to industry and process and to assess the risk of those occupational exposure to benzene.

Methods: The benzene exposure matrices were assembled depending on industry and process, based on an exposure database provided by KOSHA(the Korean Occupational Safety and Health Agency), which was gathered from a workplace hazards evaluation program in Korea. These exposure matrices were assessed by Hallmark Risk Assessment tool.

Results: The benzene was treated 412 industries sector(36%), 2,747 business places, and 471 industrial processes according to database. The arithmetic mean of past decade 8 hours time-weighted average of airborne benzene concentrations in the workplace was 0.10722 ppm. 1.07% of the total sample were greater than OEL, and 59.8% were showed less than the limit of detection. The highest risk values(Danger Value) were seen 36 industries including manufacture of general paints and similar product and 12 processes, such as other painting of manufacture of metal fabricated members. Exposure matrices based on employee exposure data base may provide exposure histories and can be used in epidemiological studies.

Conclusions: It was found that more attentions should be paid to 36 among 412 industries and 12 of 471 processes, with a higher risk value.

Key words: benzene, exposure matrix, hallmark risk assessment

I. 서 론

벤젠은 화학물질 생산 공정에서 중요한 용매로 사용되며, 대표적인 직업성 발암물질로 사회적 관심이 증가하면서 산업보건 분야에서 가장 중요한 물질 중 한 가지라고 할 수 있다.

ATSDR(Agency for Toxic Substances and Disease Registry)에 따르면 벤젠은 화산 폭발, 산불, 폐놀 등 화학 물질의 합성, 합성 섬유 생산, 고무, 운할유,

살충제, 의약품, 염료의 제조 등 자연적 혹은 인위적으로 만들어질 수 있으며, 방향족화합물 생산의 주원료로 사용되는데, 순수 벤젠은 합성원료로서 염료, 합성고무, 유기안료, 유기 고무 약품, 합성섬유(나일론), 합성수지(폴리스티렌, 페놀, 폴리에스터), 농약, 가소제, 사진약품, 폭약(피크리산), 방충제(파라디클로로벤젠), 방부제(PCP), 절연유(PDP) 등에 사용된다(ATSDR, 2007).

벤젠에 의한 급·만성독성은 주로 직업노출을 통해

*Corresponding author: Kwonchul Ha, Tel: 055-213-3553, E-mail: kcha@changwon.ac.kr

Department of Biochemistry and Health Science, Changwon National University. 20 Changwondaehak-ro, Uichang-gu, Changwon-si, Gyeongnam 641-773

Received: May 26, 2015, Revised: June 10, 2015, Accepted: June 21, 2015

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.

서 나타나며, 급성으로 노출되면 중추신경을 억제하고, 만성으로 노출되면 백혈구감소증, 무과립구증, 재생불량성빈혈, 골수형성이상증후군, 범혈구감소증, 백혈병 등을 유발한다(Cha et al., 1994; An et al., 2003; Rosenstock et al., 2005).

벤젠에 대해 우리나라 고용노동부에서는 1A(사람에게 충분한 발암성 증거가 있는 물질)로 제안하고 있으며(MoEL, 2013), 국제암연구소(International Agency of Research on Cancer, IARC)에서 Group 1(Carcinogenic to humans)로 (IARC, 2013). 미국정부산업위생전문가 협의회(American Conference of Governmental Industrial Hygienists, ACGIH)에서 A1(Confirmed human carcinogen)으로 발암성을 분류하고 있어(ACGIH, 2015), 확실한 인체 발암물질이라고 할 수 있다.

미국 산업안전보건청(Occupational Safety and Health Administration, OSHA)은 작업장에서 벤젠의 노출 수준(Time-Weighted Average, TWA)을 하루 8시간, 주 40시간 일하는 동안에 공기 중 최대 허용 농도를 1 ppm으로 규제하고 있다(OSHA, 2015).

작업환경 중 벤젠에 대한 노출기준은 우리나라 고용노동부를 비롯해 미국 산업안전보건청(OSHA), 영국 보건안전청(Health & Safety Executive, HSE) 등에서는 8시간 시간가중평균치로 1 ppm을 제안하고 있다. ACGIH에서는 0.5 ppm, 미국 국립산업안전보건연구원(National Institute for Occupational Safety and Health, NOISH)에서는 0.1 ppm 이하로 권고하고 있다. 단시간노출농도(Short-term exposure limit, STEL)는 고용노동부와 OSHA의 경우 5 ppm, ACGIH 2.5 ppm, NOISH 1 ppm으로 제안하고 있다.

1999년 작업환경실태조사 결과에 따르면, 벤젠을 제조하는 사업장은 15개소, 사용하는 사업장은 102개소 등으로 조사되었고, 생산량은 360만 톤, 사용량은 102만 톤, 노출되는 근로자 수는 934명으로 파악되었으나, 조사 시 소규모 사업장에 대한 누락 등으로 그 정확성은 확신할 수 없으며, 특히 당시 통계청 산업생산연보와도 상당한 차이가 있었다고 보고하고 있다(Kim, 2011).

한편, 산업 발달과 함께 다양한 목적으로 사용되었던 벤젠 등 잠복기가 긴 발암물질에 대해 과거 노출 수준을 파악하고 질병과 업무관련성 규명을 위하여 노출 시기, 수준, 업종, 공정, 직무 등을 조합한 노출 매트릭스

방법이 연구에 많이 활용되고 있다(KOSHA, 2008). 우리나라에서도 건강 유해인자에 대한 노출 매트릭스를 구축하여 노출과 건강영향 감시, 과거 노출 농도 추정, 업무 관련성 평가 등을 통해 상대적으로 위험 수준이 높은 노출군을 집중적으로 관리할 필요가 있다. 특히 사업장을 대상으로 정기적으로 실시되고 있는 우리나라의 작업환경측정 제도는 노출매트릭스 구축에 매우 유용하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 데이터베이스 형태로 축적되고 있는 작업환경 측정 자료를 근거로 그 활용 가능성을 파악하고, 벤젠을 취급하는 사업장에 대해 노출 시기, 업종이나 공정별로 노출 매트릭스(Exposure Matrix, EM)를 설정하여 그에 따른 위험성을 평가하여, 상대적으로 위험이 높은 업종과 공정 즉, 고위험군(High risk exposure matrix)을 선정하여 관리가 필요한 위험 노출군을 파악하는데 있다.

II. 연구 대상 및 방법

1. 연구 대상

업종, 공정별 매트릭스를 구축하기 위하여 2002년~2011년까지 벤젠을 취급하는 전국 사업장을 대상으로 조사한 작업환경측정 자료를 이용하였다. 이는 작업환경 지정측정기관에서 측정을 수행한 후 안전보건공단에 자료를 제출하게 되고 이는 데이터베이스(DB) 형태로 보관된다. 안전보건공단에서 제공한 벤젠 DB의 시료 수는 총 18,434건이다. 제9차 한국표준산업분류(Korean Standard Industrial Classification, KSIC)에 따르면 우리나라의 총 업종 수는 1,145개이며(Statics Korea, 2008), 이중 벤젠을 취급하고 있는 업종은 36%에 해당하는 412개로 나타났다.

2. 연구방법

벤젠과 관련한 국내외 법규 및 제도, 사례, 참고문헌 고찰을 바탕으로 벤젠 관련 작업환경측정 자료 DB를 기초로 업종, 공정별 노출매트릭스를 설정하였다. 이렇게 설정된 노출 매트릭스의 위험성을 평가하기 위해서 미국산업위생학회(American Industrial Hygiene Association, AIHA)가 추천하고, 작업환경측정 결과 DB를 통해 얻을 수 있는 노출 관련 정보를 평가에 활용할 수 있는 홀마크 위험성 평가(Guidance for

conducting control banding analysis - Hallmark risk assessment) 방법을 활용하였다(AIHA, 2007).

3. 홀마크 위험성 평가

(1) 유해성 등급(Hazard Rating, HR)

유해성 등급은 물질안전보건자료에 제시된 화학물질의 휘발성, 노출기준, 인화점, 독성정보 등을 근거로 1, 2, 3, 4, 6 등급으로 구분한다(AIHA, 2007). 벤젠은 직업적 노출을 통해 발암성이 확인되었기 때문에 가장 높은 6등급으로 분류된다.

(2) 취급 시간 등급(Duration of Use Rating, DUR)

취급 노출시간의 차이는 위험성을 평가를 하는데 매우 중요하다. 그 이유는 근로자들이 화학물질을 취급 시 노출될 수 있는 시간은 근로자마다 모두 다르기 때문이다. 홀마크 방법에서는 정확한 평가를 위해 분/일, 시간/주, 일/월, 일/년 등으로 1등급에서 5등급으로 구분하고 있다. 취급 시간 등급은 <식 1>을 이용하여 등급을 결정한다.

$$DUR = 1 + (4 \times \frac{\text{근무시간}}{\text{최대노출가능시간}}) \quad \dots \text{ <식 1>}$$

(3) 위험 가능성 등급(Risk Probability Rating, RPR)

홀마크 방법에서는 위험성 평가 시 측정 자료가 있는 경우와 자료가 없는 두 가지 방법을 제시하고 있다. 본 연구는 측정 자료가 있는 경우를 적용하여 위험특성비(Risk Characterization Ratio, RCR)를 <식 2>와 같이 측정값을 노출기준으로 나누어 구한다. 이를 토대로 위험 가능성 등급을 6개의 등급으로 나누는데, 노출 매트릭스의 시료가 7개 이상으로 모든 시료가 불검출(Not-detected)일 때 “등급 0”으로 결정하며, 시료가 노출기준의 10%미만일 때는 “등급 1”, 50%미만일 때는 “등급 2”, 시료 중 단 하나라도 노출기준의 50%를 초과 할 때는 “등급 3”, 전체 시료의 30% 이상이 노출기준의 50% 초과 시에는 “등급 6”, 하나의 시료라도 노출 기준을 초과하면 “등급 10”의 값을 적용한다(AIHA, 2007).

$$RCR = (\frac{\text{Exposure Concentration}}{\text{OEL}}) \times 100 \quad \dots \text{ <식 2>}$$

(4) 위험값(Danger Value, DV)

위험값은 근로자의 화학물질 취급 시 위험정도를 수치화 한 것으로 유해성등급(HR), 취급시간등급(DUR), 위험가능성 등급(RPR) 등을 토대로 하여 위험값인 DV값을 <식 3>에 의해서 계산한다.

$$DV = (\frac{HR \times DUR \times RPR}{300}) \times 100 \quad \dots \text{ <식 3>}$$

(5) 관리수준(Control Banding, CB)

위험값에 따라 관리수준은 위험값이 0~24는 1단계, 25~49는 2단계, 50~74는 3단계, 75~100은 4단계로 구분한다. AIHA에서 관리수준 등급에 따라 적절한 관리방안을 제시하고 있다(AIHA, 2007).

4. 자료의 통계처리

통계분석은 2002년부터 2011년까지 측정된 공기 중 벤젠에 대한 작업환경측정결과 자료를 Microsoft Excel 2010, Sigma Plot 10.0 for Window, SPSS 18.0K for Window를 이용하여 데이터베이스를 구축한 후 기술통계 자료를 제시했고, 자료의 분포, 교차 분석, ANOVA 등의 통계분석을 하였다(KOSHA, 2008).

III. 결과 및 고찰

1. 작업환경측정 결과를 통한 벤젠 노출 수준 변화

작업환경에서 측정된 공기 중 벤젠의 총 시료 수 18,434건 중 신뢰성이 떨어지는 업종 등 일부 항목의 자료가 소실된 395개 시료를 제외한 분석 대상이 되는 시료 수는 18,039개였다. 이 중 6시간 이상 측정된 시료는 전체 시료의 99.56%에 해당하는 17,960개였다. 벤젠을 취급하는 사업장 수는 10년간 3,709개로 나타났으나 보통 반기별로 측정이 이루어지므로 연도별로 표시한 사업장 수는 이중으로 계수된 값이라고 할 수 있다. 2011년의 경우 448개 사업장에서 근로자에 대한 노출평가가 수행된 것으로 파악되었다(Table 1).

과거 10년간 측정된 공기 중 벤젠의 8시간 시간가중평균치는 0.10722 ppm이었으며, 노출기준을 초과한 비율이 전체적으로 1.07%였으며, 전체시료의 59.8%가 검출한계 이하인 것으로 나타났다(Table 1).

Table 1. Summary of 10 years(2002~2011) benzene exposure assesment data base by year

| Year | No. of Business Place [†] | No. of Samples | TWA(ppm) [†] | | | | | STEL(ppm) | | | | % above of OEL | % LOD |
|-------|------------------------------------|----------------|-----------------------|---------|-------|----------|-------|----------------|----------|-------|-------|----------------|-------|
| | | | Range | AM | SD | GM | GSD | No. of Samples | Range | AM | SD | | |
| 2002 | 82 | 299 | LOD ~ 5.29 | 0.08940 | 0.407 | 0.000039 | 274.9 | - | - | - | - | 0 | 49.5 |
| 2003 | 120 | 594 | LOD ~ 2.27 | 0.04846 | 0.203 | 0.000081 | 145.1 | - | - | - | - | 0.99 | 64.5 |
| 2004 | 304 | 1,040 | LOD ~ 1.12 | 0.05176 | 0.148 | 0.000032 | 184.8 | - | - | - | - | 0.19 | 0 |
| 2005 | 769 | 2,027 | LOD ~ 34.62 | 0.15047 | 1.120 | 0.000062 | 407.9 | - | - | - | - | 2.42 | 60.0 |
| 2006 | 169 | 962 | LOD ~ 127.53 | 0.68673 | 5.324 | 0.000111 | 594.6 | - | - | - | - | 4.68 | 56.7 |
| 2007 | 574 | 2,155 | LOD ~ 91.78 | 0.22959 | 2.450 | 0.000163 | 380.9 | - | - | - | - | 2.60 | 49.4 |
| 2008 | 530 | 2,464 | LOD ~ 6.99 | 0.05359 | 0.275 | 0.000007 | 159.3 | 33 | LOD-3.00 | 0.389 | 0.885 | 0.49 | 77.9 |
| 2009 | 357 | 2,078 | LOD ~ 3.25 | 0.04088 | 0.235 | 0.000005 | 113.0 | 25 | LOD-0.58 | 0.023 | 0.116 | 0.48 | 81.1 |
| 2010 | 356 | 2,293 | LOD ~ 0.95 | 0.03224 | 0.092 | 0.000017 | 205.7 | 5 | LOD-1.04 | 0.210 | 0.466 | 0 | 69.2 |
| 2011 | 448 | 4,048 | LOD ~ 0.97 | 0.01604 | 0.070 | 0.000003 | 61.4 | 16 | LOD-1.95 | 0.221 | 0.516 | 0 | 84.7 |
| Total | 3,709 | 17,960 | LOD ~ 127.53 | 0.10722 | 1.558 | 0.000015 | 218.1 | 79 | LOD-3.00 | 0.228 | 0.065 | 1.07 | 59.8 |

^{*} It can be marked by year overlap, because employee exposure assessment for benzene is usually conducted semiannually.

[†] TWA: Time-Weighted Average, STEL: Short Term Exposure Limits, AM: Arithmetic Mean, GM: Geometric Mean, GSD: Geometric Standard Deviation, OEL: Occupational Exposure Limits, LOD: Limit of Detection

연도별 비교를 위하여 산술평균치를 조사한 결과 2006년이 가장 높게 나타났으며, 2007년 이후 산술 평균이나 기하평균이 모두 감소하고 있어 벤젠 노출 수준이 점차 감소하고 있는 경향을 보여주며(Figure 1), 특히 2010년과 2011년에는 노출기준을 초과하는 시료는 없었다. 2006년에 가장 높은 평균값과 노출 기준 초과율을 보여주었는데, 이는 보고된 시료수가 다른 해에 비해 현저히 낮아서 이상치(Outlier)로 생각되는 시료들의 영향으로 판단된다.

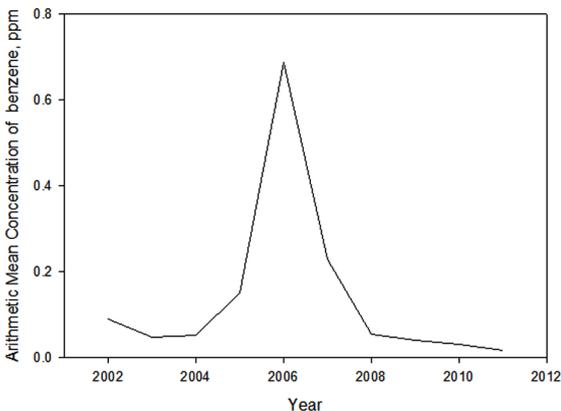


Figure 1. Comparison of arithmetic mean of airborne benzene concentrations by year

벤젠에 대한 법적 노출기준을 10 ppm에서 1 ppm으로 더 엄격히 규제하기 시작한 2003년 하반기 이전까지는 기준을 초과하는 시료가 없었으나, 이후부터 2009년까지는 기준을 초과하는 시료가 전체 시료 중 0.5~4.7%를 차지하였다. 새로운 법 기준 준수까지 약 6년이 소요된 것으로 나타났다.

단시간노출농도는 2008년부터 측정된 자료가 보관되고 있었으며, 4년간 평균농도는 0.228 ppm이었고, 연도별로는 2008년에 0.389 ppm으로 가장 높은 수치로 파악되었다.

작업환경측정 자료를 근거로 하였기 때문에 특별한 공정이나 작업을 대상으로 한 다른 연구자(Kim, 2011)들의 벤젠 노출 수준보다는 낮게 나타났으며, 평균값과 기하평균의 차이가 크게 난 것도 59.8%의 측정치가 검출한계수준으로 분석되었기 때문인 것으로 파악되었다.

2. 업종별 노출 매트릭스의 위험성

벤젠 취급 노출그룹의 위험성을 평가하기 위해서 우선적으로 유해성 등급(HR)을 발암성, 노출기준, 물리화학적 특성, 독성정보 등을 참고하여 결정하였다. 고용노동부(한국)와 미국 OSHA, ACGIH, NIOSH 등에서 발암물질로 규정하여 0.1~1 ppm의 노출기준

(TWA)을 제시하고 있으며, 인화점은 -11.1℃(밀폐상태)로 고인화성을 가지며, 산화제와 격렬하게 반응하고, 휘발성이 강하며 기화하기 쉽기 때문에 벤젠의 유해성 등급은 6등급 “극단(인체발암성으로 확인되거나 의심됨)”으로 결정하였다.

업종별 위험성 평가를 수행하기 위해 신뢰도를 확보하기 위해 시료 중 이상치와 결측치 등이 있는 시료를 제외한 후, 업종별로 시료수가 7개 미만인 것은 다시 대상에서 제외하였다. 분석대상이 되는 유효 시료 수는 17,154개였으며, 업종별 노출 매트릭스는 412개 업종 중 177개 업종(2,512개 사업장)이었다.

각 업종의 벤젠 취급시간은 홀마크 방법에서 제시된 <식 1>에 따라 계산되었고, 업종별 벤젠 취급시간은 120~480으로 나타나 취급시간등급(DUR)은 2, 3, 4, 5등급으로 나타났으며, 그 중 5등급이 16,464개(96%), 4등급이 508개(3%)로 전체의 99%를 차지했다. 즉, 벤젠 취급 작업은 99%가 전 작업시간동안 수

행한다고 할 수 있다.

위험특성비 등급은 0등급에서 최대 10등급까지 나타났다. 유효 시료 17,154개 중 불검출(0등급) 4,583개(26.7%), 노출기준 대비 10% 미만(1등급)이 10,612개(61.9%), 노출기준 대비 50% 미만(2등급)이 1,494개(8.7%), 노출기준 대비 50% 이상에서 100% 미만(3등급)이 313개(1.8%), 기준을 초과(4등급)이 152개(0.9%)가 있었다.

위험가능성 등급은 최대 등급이 10등급은 36개 업종, 6등급은 19개 업종, 3등급은 19개 업종, 2등급은 53개 업종, 1등급은 27개 업종이었으며, 업종에서 측정된 값이 불검출이 되어 0등급으로 분류된 업종이 23개로 나타났다.

위험성 평가의 요소인 HR, DUR, RPR을 모두 고려하여 벤젠을 취급하는 사업장 2,512개에 대해 업종별 매트릭스를 구성하여 각 매트릭스에 대한 위험성 평가를 실시한 결과는 Table 2와 같다.

Table 2. Risk assesment of benzene exposure matrices by industry

| Industry | No. of Business Place | Working hours (min/day) | No. of Sample | HR | DUR | RPR(Risk Probability Rating) | | | | | Rating [†] | DV | CB |
|--|-----------------------|-------------------------|---------------|----|-----|---|-----------|-----------|---------|---------|---------------------|-----|----|
| | | | | | | RCR [*] Category, No. of Sample(%) | | | | | | | |
| | | | | | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | | | |
| Commercial printing by stencil paper plate and similar plates | 50 | 475 | 145 | 6 | 5 | 72(49.65) | 49(33.8) | 19(13.1) | 4(2.76) | 1(0.69) | 10 | 99 | 4 |
| All Other Supporting Transport Services n.e.c. | 5 | 475 | 11 | 6 | 5 | 10(90.9) | 0(0) | 0(0) | 0(0) | 1(9.1) | 10 | 99 | 4 |
| Other Manufacturing n.e.c. | 33 | 475 | 165 | 6 | 5 | 24(14.5) | 118(71.5) | 18(10.9) | 3(1.8) | 2(1.3) | 10 | 99 | 4 |
| Manufacture of All Other Chemical Products n.e.c. | 81 | 479 | 912 | 6 | 5 | 50(5.5) | 712(78.1) | 122(13.4) | 17(1.8) | 11(1.2) | 10 | 100 | 4 |
| Manufacture of Other General-Purpose Machinery n.e.c. | 21 | 469 | 43 | 6 | 5 | 2(4.6) | 33(76.7) | 6(13.9) | 1(2.4) | 1(2.4) | 10 | 98 | 4 |
| Manufacture of Other Parts and Accessories for Motor Vehicles n. e. c. | 30 | 479 | 235 | 6 | 5 | 87(37) | 102(43.4) | 41(17.4) | 4(1.7) | 1(0.5) | 10 | 100 | 4 |
| Manufacture of Other Electronic Valves, Tubes and Electronic Components n.e.c. | 54 | 478 | 371 | 6 | 5 | 2(0.5) | 334(90) | 23(6.2) | 6(1.65) | 6(1.65) | 10 | 100 | 4 |
| Manufacture of other fabricated metal products nec | 19 | 480 | 82 | 6 | 5 | 4(4.9) | 58(70.7) | 8(9.8) | 3(3.6) | 9(11) | 10 | 100 | 4 |
| Manufacture of Other Plastic Products n.e.c. | 17 | 464 | 74 | 6 | 5 | 1(1.3) | 46(62.1) | 15(20.3) | 5(6.8) | 7(9.5) | 10 | 97 | 4 |
| Heat Treatment of Metals | 11 | 471 | 69 | 6 | 5 | 53(76.8) | 14(20.3) | 1(1.45) | 0(0) | 1(1.45) | 10 | 99 | 4 |
| Manufacture of Metal Structural Components | 15 | 476 | 30 | 6 | 5 | 7(23.3) | 7(23.3) | 15(50) | 0(0) | 1(3.4) | 10 | 99 | 4 |
| Manufacture of Metal Fasteners and Screw Products | 2 | 404 | 10 | 6 | 4 | 0(0) | 5(50) | 2(20) | 1(10) | 2(20) | 10 | 87 | 4 |
| Manufacture of Locomotives and Railway Rolling Stock | 5 | 461 | 23 | 6 | 5 | 20(87.1) | 0(0) | 1(4.3) | 1(4.3) | 1(4.3) | 10 | 97 | 4 |

| Industry | No. of Business Place | Working hours (min/day) | No. of Sample | HR | DUR | RPR(Risk Probability Rating) | | | | | Rating [†] | DV | CB |
|--|-----------------------|-------------------------|---------------|----|-----|---------------------------------|---------------|-------------|-----------|-----------|---------------------|-----|----|
| | | | | | | RCR* Category, No. of Sample(%) | | | | | | | |
| | | | | | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | | | |
| Other Building and Repairing of Ships and Boats | 7 | 480 | 265 | 6 | 5 | 256(96.6) | 4(1.5) | 2(0.7) | 1(0.5) | 2(0.7) | 10 | 100 | 4 |
| Other Printing | 222 | 468 | 612 | 6 | 5 | 1(0.1) | 459(75) | 124(20.3) | 17(2.8) | 11(1.8) | 10 | 98 | 4 |
| Other Manufacture of parts and accessories for motor vehicles and its engines | 90 | 466 | 332 | 6 | 5 | 16(4.8) | 190(57.2) | 94(28.3) | 27(8.1) | 5(1.6) | 10 | 98 | 4 |
| Other basic non-ferrous metals industries | 2 | 480 | 44 | 6 | 5 | 11(25) | 32(72.7) | 0(0) | 0(0) | 1(2.3) | 10 | 100 | 4 |
| Other Retail sale of hardware and heating equipment | 1 | 424 | 20 | 6 | 5 | 0(0) | 4(20) | 8(40) | 5(25) | 3(15) | 10 | 91 | 4 |
| Coating and Similar Treatment of Metals | 22 | 473 | 48 | 6 | 5 | 23(47.9) | 12(25) | 10(20.8) | 1(2.1) | 2(4.2) | 10 | 99 | 4 |
| Industrial Laundry Services | 2 | 480 | 40 | 6 | 5 | 12(30) | 12(30) | 15(37.5) | 0(0) | 1(2.5) | 10 | 100 | 4 |
| Manufacture of Basic Organic Petrochemicals | 75 | 476 | 2,893 | 6 | 5 | 96(3.3) | 2,586(89.4) | 172(5.9) | 22(0.8) | 17(0.6) | 10 | 99 | 4 |
| Manufacture of Sections for Ships | 14 | 480 | 259 | 6 | 5 | 201(77.6) | 45(17.3) | 10(3.9) | 1(0.4) | 2(0.8) | 10 | 100 | 4 |
| Petroleum Refineries | 54 | 475 | 2,042 | 6 | 5 | 16(0.8) | 1,962(96.1) | 46(2.3) | 14(0.7) | 4(0.1) | 10 | 99 | 4 |
| Manufacture of General Paints and Similar Products | 26 | 478 | 89 | 6 | 5 | 4(4.5) | 48(53.9) | 20(22.5) | 15(16.9) | 2(2.2) | 10 | 100 | 4 |
| Repair Services of Motor Vehicles Specializing in Parts | 49 | 330 | 81 | 6 | 4 | 34(42) | 7(8.6) | 17(21) | 12(14.8) | 11(13.6) | 10 | 75 | 4 |
| General Repair Services of Motor Vehicles | 178 | 444 | 377 | 6 | 5 | 237(62.9) | 78(20.7) | 42(11.1) | 12(3.2) | 8(2.1) | 10 | 94 | 4 |
| Manufacture of Parts and Accessories for Motor Vehicle Body | 23 | 475 | 274 | 6 | 5 | 221(80.7) | 26(9.5) | 20(7.3) | 5(1.8) | 2(0.7) | 10 | 99 | 4 |
| Manufacture of Other Basic Iron and Steel | 3 | 480 | 54 | 6 | 5 | 30(55.5) | 20(37) | 3(5.6) | 0(0) | 1(1.9) | 10 | 100 | 4 |
| General Hospitals | 52 | 475 | 194 | 6 | 5 | 12(6.2) | 162(83.5) | 12(6.2) | 5(2.6) | 3(1.5) | 10 | 99 | 4 |
| Automotive Oil Stations | 424 | 471 | 661 | 6 | 5 | 3(0.5) | 633(95.8) | 16(2.4) | 6(0.9) | 3(0.4) | 10 | 98 | 4 |
| Manufacture of Motor Vehicle Bodies and Motor Vehicles Assembled on Purchased Chassis | 6 | 436 | 27 | 6 | 5 | 1(3.7) | 7(25.9) | 10(37) | 5(18.5) | 4(14.8) | 10 | 93 | 4 |
| Supporting, Railway Transport Activities | 16 | 475 | 86 | 6 | 5 | 4(4.7) | 74(86) | 6(7) | 0(0) | 2(2.3) | 10 | 99 | 4 |
| Plastic Adhesive tape and Coating and Other Surface Processing Products | 23 | 445 | 231 | 6 | 5 | 53(22.9) | 76(32.9) | 64(27.7) | 20(8.7) | 18(7.8) | 10 | 94 | 4 |
| Manufacture of Synthetic Resin and Other Plastic Materials | 35 | 463 | 337 | 6 | 5 | 4(1.2) | 282(83.7) | 46(13.6) | 3(0.9) | 2(0.6) | 10 | 97 | 4 |
| Building of Synthetic resin Ships | 5 | 480 | 10 | 6 | 5 | 5(50) | 0(0) | 1(10) | 1(10) | 3(30) | 10 | 100 | 4 |
| Manufacture of Synthetic Colouring Matter, Tanning Materials and Other Coloring Agents | 5 | 480 | 10 | 6 | 5 | 9(90) | 0(0) | 0(0) | 0(0) | 1(10) | 10 | 100 | 4 |
| Total | 2,512 | | 17,154 | 6 | 5 | 4,583 (26.7) | 10,612 (61.9) | 1,494 (8.7) | 313 (1.8) | 152 (0.9) | | | |

* Risk Characterization Ratio (RCR, Concentration/OEL) category : 0. Not-detected, 1. < 10% OEL, 2. < 50% OEL, 3. < 100% OEL, 4. exceeded OEL
[†] Risk Probability Rating(RPR) : 0. All seven or more samples are not-detect, 1. All samples indicate < 10% of exposure limit, 2. All samples indicate < 50% OEL, 3. One sample was > 50% OEL, 6. More than 50 % of samples were > 50% OEL, 10. One or more samples exceeded exposure limit.

관리수준 1단계에는 103개 업종, 501개 사업장, 2 단계에는 19개 업종, 130개 사업장, 3단계 사업장에는 19개 업종, 204개 사업장으로 나타났다. 벤젠을 취급하는 업종 중 가장 위험한 4단계는 100점의 위험값을 보였으며, 1,677개(66.7%)의 사업장이었다.

업종을 대상으로 한 위험성 평가는 유해성 등급이 동일하고, 취급시간의 경우도 거의 같은 값을 가지고 있기 때문에 위험성 요인 중 가장 큰 영향을 미친 것은 RPR값으로 나타났다. 관리등급이 4등급인 고 위험군 중 상위 3개 업종으로는 합성수지 건조업(기하

평균 0.00099 ppm, 기하표준편차 3,162), 금속파스너 및 나사제품 제조업(기하평균 0.02359 ppm 기하표준편차 423.36), 기타 철물, 난방용구 및 건설자재 소매업(기하평균 0.31631 ppm 기하표준편차 4.94)순으로 파악되었다.

본 연구에서 활용한 홀마크 위험성 평가는 물질의 유해성, 취급시간, 노출가능위험성 등을 고려한 위험값으로 평가하는 방법으로 다른 방법과는 달리 정량적 및 정성적인 측면에서 접근할 수 있다는 장점이 있다. 위험값에 따라 4가지 단계의 관리수준으로 분

Table 3. Risk assesment of benzene exposure matrices by process

| Industry | Process | No. of Business Place | Working hours (min/day) | No. of Sample | HR | DUR | RPR (Risk Probability Rating) | | | | | Rating** | DV | CB |
|---|-----------------------|-----------------------|-------------------------|---------------|----|---------|---------------------------------|--------------|-----------|----------|----------|----------|-----|----|
| | | | | | | | RCR* Category, No. of Sample(%) | | | | | | | |
| | | | | | | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | | | |
| Manufacture of metal fabricated members | Other Painting | 9 | 473 | 16 | 6 | 5 | 2(12.5) | 2(12.5) | 11(68.8) | 0(0) | 1(6.2) | 10 | 100 | 4 |
| | Blast painting | 2 | 480 | 5 | 6 | 5 | 0(0) | 3(60) | 0(0) | 2(40) | 0(0) | 6 | 60 | 3 |
| Manufacture of Metal Fasteners and Screw Products | Other scrubbing | 2 | 408 | 8 | 6 | 4 | 0(0) | 5(62.5) | 1(12.5) | 0(0) | 2(25) | 10 | 80 | 4 |
| Retail Sale of Hardware, Heating Equipment and Construction Materials | Other | 1 | 424 | 20 | 6 | 5 | 0(0) | 4(20) | 8(40) | 5(25) | 3(15) | 10 | 100 | 4 |
| Manufacture of basic organic chemicals in petroleum chemical line | PVC sheath | 1 | 480 | 85 | 6 | 5 | 61(71.8) | 19(22.3) | 5(5.9) | 0(0) | 0(0) | 2 | 20 | 1 |
| | Pressurization | 1 | 480 | 5 | 6 | 5 | 3(60) | 1(20) | 0(0) | 0(0) | 1(20) | 10 | 100 | 4 |
| | Relay | 4 | 470 | 50 | 6 | 5 | 38(76) | 10(20) | 0(0) | 0(0) | 2(4) | 10 | 100 | 4 |
| | Official affairs | 10 | 479 | 246 | 6 | 5 | 169(68.7) | 60(24.4) | 16(6.5) | 0(0) | 1(0.4) | 10 | 100 | 4 |
| | Machine room | 2 | 480 | 30 | 6 | 5 | 30(100) | 0(0) | 0(0) | 0(0) | 0(0) | 0 | 0 | 1 |
| | Other | 43 | 474 | 900 | 6 | 5 | 24(2.7) | 783(87) | 65(7.2) | 17(1.9) | 11(1.2) | 10 | 100 | 4 |
| | Repair work | 3 | 467 | 9 | 6 | 5 | 4(44.4) | 1(11.1) | 1(11.1) | 3(33.4) | 0(0) | 6 | 60 | 3 |
| Petroleum Refineries | Analysis | 16 | 478 | 112 | 6 | 5 | 8(7.1) | 99(88.4) | 5(4.5) | 0(0) | 0(0) | 2 | 20 | 1 |
| | Tankage | 2 | 463 | 52 | 6 | 5 | 21(40.4) | 18(34.6) | 12(23.1) | 1(1.9) | 0(0) | 3 | 30 | 2 |
| | Shipment | 21 | 479 | 105 | 6 | 5 | 1(1) | 97(92.3) | 6(5.7) | 0(0) | 1(1) | 10 | 100 | 4 |
| | Waste water treatment | 10 | 466 | 48 | 6 | 5 | 1(2.1) | 41(85.4) | 5(10.4) | 0(0) | 1(2.1) | 10 | 100 | 4 |
| | Other | 24 | 478 | 381 | 6 | 5 | 7(2) | 359(94.2) | 10(2.6) | 3(0.7) | 2(0.5) | 10 | 100 | 4 |
| | Chemical equipment | 1 | 450 | 9 | 6 | 5 | 3(33.3) | 4(44.5) | 0(0) | 0(0) | 2(22.2) | 10 | 100 | 4 |
| Manufacture of household articles of plastic material | Other | 8 | 415 | 52 | 6 | 4 | 5(9.6) | 15(29) | 16(30.7) | 5(9.6) | 11(21.1) | 10 | 80 | 4 |
| Building of Synthetic resin Ships | Other coating | 8 | 433 | 46 | 6 | 5 | 8(17.4) | 18(39.1) | 12(26) | 4(8.75) | 4(8.75) | 10 | 100 | 4 |
| | Other meld | 2 | 399 | 28 | 6 | 4 | 0(0) | 11(39.3) | 10(35.7) | 4(14.3) | 3(10.7) | 10 | 80 | 4 |
| Laminated molding | 4 | 480 | 8 | 6 | 5 | 3(37.5) | 0(0) | 1(12.5) | 1(12.5) | 3(37.5) | 10 | 100 | 4 | |
| Total | | 409 | | 5,101 | | | 1,977 (38.8) | 2,723 (53.4) | 289 (5.6) | 64 (1.3) | 48 (0.9) | | | |

* Risk Characterization Ratio (RCR, Concentration/OEL) category : 0. Not-detected, 1. < 10% OEL, 2. < 50% OEL, 3. < 100% OEL, 4. exceeded OEL
 ** Risk Probability Rating(RPR) : 0. All seven or more samples are not-detect, 1. All samples indicate < 10% of exposure limit, 2. All samples indicate < 50% OEL, 3. One sample was > 50% OEL, 6. More than 50 % of samples were > 50% OEL, 10. One or more samples exceeded exposure limit.

류한 후 AIHA에서 제시하는 단계별 관리방안을 적절하게 사업장에 활용할 수 있다. 세세한 관리방안이 제시된 관리수준 1~3등급과는 달리 가장 위험한 관리수준 4등급에 해당하는 것은 즉각적으로 생산 활동을 멈추고 산업위생가전문가의 도움을 받도록 제안하고 있다(AIHA, 2007).

3. 공정별 노출 매트릭스의 위험성

벤젠을 취급하는 총 471개 공정 중 신뢰성 확보를 위해 이상치 및 결측치를 포함한 시료를 제외한 후 공정 매트릭스별 시료수가 7개 이하인 143개 공정을 제외한 328개 공정을 대상으로 그 위험성을 파악하였다. 특히 근로자의 평균 벤젠 노출수준이 노출기준인 1 ppm을 초과하는 5개 업종(금속파스너 및 나사제품 제조업, 합성수지선 건조업, 기타 철물/난방용구 및 건설자재 소매업, 금속 조립구조재 제조업, 플라스틱 접착테이프 및 기타 표면도포제품 제조업)과 작업환경측정이 가장 많이 이루어진 2개 업종(석유화학계 기초화학물질제조업, 원유정제처리업)등 총 7개의 업종에 대한 21개 공정 매트릭스에 대한 위험성 평가를 실시하였으며 그 결과는 Table 3과 같다.

17,154개 시료 중 유효한 15,101개 시료를 대상으로 위험특성비를 분석한 결과 불검출(0등급) 1,977개 (38.8%), 노출 기준 대비 10% 미만(1등급)이 2,723개 (53.4%), 노출대비 10~49%(2등급)에 해당되는 시료는 289개(5.6%)이었으며, 노출기준 대비 50% 이상에서 100% 미만(3등급)이 64개(1.3%)로 나타났으며, 노출기준을 초과(4등급)하는 경우는 48개(0.9%)로 파악되었다.

RPR의 최대 등급인 10등급을 나타내는 공정 매트릭스는 금속 조립구조재 제조업의 기타도장 공정, 금속파스너 및 나사제품 제조업의 기타 세척공정, 기타 철물, 난방용구 및 건설자재 소매업의 기타공정, 석유화학계 기초화학물질제조업의 가압, 계진, 공무, 기타, 출하, 폐수처리 공정, 원유정제처리업의 기타, 화학설비 공정, 플라스틱 접착테이프 및 기타 표면도포제품 제조업의 기타, 기타코팅, 기타혼합 공정, 합성수지선 건조업의 적층성형공정이 있었다. 이들 12개의 공정 매트릭스는 위험값이 100이었다.

관리수준 4단계는 21개의 공정 매트릭스 중 71.4%인 15개 공정이었다. 업종을 대상으로 한 위험성 평

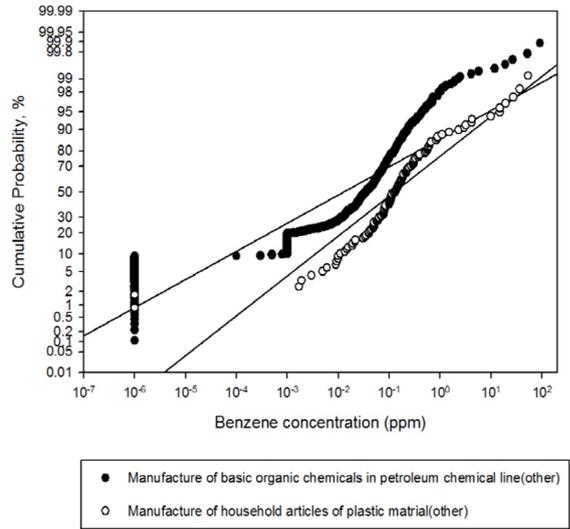


Figure 2. Cumulative probability distributions of benzene exposure matrices classified category 4

가와 같이 공정 매트릭스에서도 위험성을 결정하는 인자 중 가장 중요한 것은 RPR 값이었다. 높은 RPR 값을 가진 공정일수록 고위험 값을 갖는 것으로 나타났다. 석유화학계 기초화학물질제조업의 기타공정, 플라스틱 접착테이프 및 기타 표면도포제품 제조업의 기타공정, 기타 코팅 고정이 고위험 군으로 나타났다.

Figure 2는 공정별 매트릭스에서 고위험 군으로 파악된 석유화학계 기초화학물질제조업의 기타공정과 플라스틱 접착테이프 및 기타 표면도포제품 제조업의 기타공정에 대해 시료의 분포도를 나타낸 것으로 대수정규분포를 하고 있었으며 두 매트릭스의 평균에서 통계적으로 유의한 차이를 보였다($p < 0.05$).

위험성 평가와 CB를 통해 근로자의 노출력을 평가하고 그 위험 정도를 업종과 공정 매트릭스 수준에서 예측하는 방법은 많은 강점이 있는 것으로 평가되고 있다. 가장 큰 장점은 DB로 저장되는 자료들을 일정한 노출 매트릭스로 위험 정도에 따라 노출이력을 구분할 수 있어 향후 역학 조사에 활용할 수 있다는 점이다(Ott et al., 1985; Rajan et al., 1997). 벤젠에 의한 직업성 발암을 평가 할 때 가장 어려운 점이 과거 노출 여부와 그 수준을 파악하는 일이라고 할 수 있다. 이렇게 구축된 매트릭스는 위험성이 큰 노출군을 구별할 수 있으며, 근로자가 일했던 업

종이나 공정만으로 과거 노출 수준을 추정하는 데도 활용할 수 있을 것이다. 또한 평가 과정이 어렵지 않아서 사업장에서 위험성 평가를 통해 노출되고 있는 위험군에 대해 평가하여 상대적 위험성을 알 수 있고, 산업보건전문가가 함께 참여한다면 보다 더 높은 정확도를 제공할 수 있다는 점이다.

핀란드, 스웨덴과 같이 매트릭스 형태로 발전 시켜 직업 노출력을 관리하게 되면 집중적으로 관리, 개선되어야 할 작업환경 구별, 노출 기준 및 정책 결정, 발암 물질에 노출된 근로자들의 직업성암 발생 추이 파악 등 다양한 목적으로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

그러나 본 연구방법의 제한점은 다른 노출 매트릭스 평가 연구에서 지적되고 있는 바와 같이 첫 번째로는 그 정확성(Validity)에 있다. 연구의 정확성을 위해서 우선적으로는 대상인 작업환경 측정 DB의 신뢰성이 확보 되어야 한다. 제외되는 자료를 최소화하고 신뢰성을 높이기 위해서는 여러 항목 중 신뢰성 있는 항목을 선정하고 이를 표준화시켜 DB를 구축해야 할 것이다. 두 번째는 같은 업종 및 공정이라 할지라도 노출 정도가 다르게 나타나는 노출 변이(Variability) 문제이다. 변이와 오분류를 최소화시키기 위해서 업무(Job)를 작업 특성에 따라 세분하여 직무(Task) 수준에서 접근함으로써 그 유사성을 더 높일 수 있는 TEM(Task Exposure Matrix) 방법이 제시되고 있다(Pukkila et al., 2005).

IV. 결 론

본 연구는 벤젠을 취급하는 업종 및 공정에 대해 2002년부터 2011년까지 작업환경측정 자료 DB를 근거로 노출 매트릭스를 구성하여 각 매트릭스에 대한 위험성 평가를 실시하였으며 연구결과는 다음과 같다.

첫째, 과거 10년간 측정된 공기 중 벤젠의 8시간 시간가중평균치는 0.10722 ppm이었으며, 노출기준을 초과한 비율이 전체적으로 1.07%였으며, 전체시료의 59.8%가 검출한계 이하인 것으로 나타났다. 2007년 이후 벤젠 노출 수준이 점차 감소하고 있는 경향이 나타나고 있으며, 특히 2010년 이후부터는 법적 기준을 초과하는 시료가 없는 것으로 나타나 새로운 노출기준 준수에 약 6년이 소요되는 것으로 나타났다.

둘째, 우리나라 전체 업종 수 1,145개 중 412개의 업종(36%)에서 벤젠을 취급하고 있었으며, 사업장 수는 2,747개, 각 업종별 공정 수는 471개로 파악되었다. 업종별 노출 매트릭스에 대한 위험성 평가에서 가장 위험한 관리수준 4단계에 해당되는 업종은 총 36개였으며, 위험값이 가장 높은 업종은 합성수지 건조업, 금속파스너 및 나사제품 제조업, 기타 철물, 난방용구 및 건설자재 소매업 등으로 파악되었다.

셋째, 벤젠을 취급하는 고위험 7개 업종의 21개 공정 매트릭스에 대한 위험성 평가 결과 71.4%인 15개 공정이 위험한 4등급에 속했으며, 특히 금속 조립구조재 제조업의 기타도장 공정 등 12개 공정 매트릭스는 위험값이 100으로 가장 위험한 군으로 평가되었다.

위험성 평가와 CB를 통해 근로자의 노출력을 평가하고 그 위험 정도를 업종과 공정 매트릭스 수준에서 예측하는 방법은 위험 정도에 따라 노출 이력을 구분할 수 있어 향후 역학 조사에 활용할 수 있다는 점이며, 제한점으로는 DB의 정확성 확보와 노출 군내의 변이를 최소화하는 것을 들 수 있다.

감사의 글

“이 논문은 2013~2014년도 창원대학교 연구비에 의하여 연구되었음.”

References

- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). Toxicological profile for benzene, 2007
- American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH), 2015 TLVs & BEIs, Threshold limit values for chemical substances and physical agents and biological exposure indices, ISBN 978-1-607260-77-6; 2015
- American Industrial Hygiene Association(AIHA): Guidance for conducting control banding analyses, 2007
- An SC, Kang JW, Kim, H. Effects of benzene exposure on genetic damage of human white blood cells. *Cungbuk Med J*, 2003;13(2):189-204
- Cha CH, Kim KJ, Kim JC, Paik NW. Development of Technology for Environmental Assessment and Biological Monitoring of Workers Exposed to Benzene. *The Kor J of Occup Med*, 1994;6(1):35-39

- International Agency for Research on Cancer(IARC). Agents Classified by the IARC Monographs, Vol. 1-109, 2013
- Kim EA. Occupational Disease Epidemiology Study 21 - Benzene Exposed Workers 2000s. Korean Industrial Health Association. 2011
- Korea Occupational Safety and Health Agency(KOSHA), Application of Matrix and Risk Assessment of Industries, Processes, and Job, Research Report, 2008
- Ministry of Employment and Labor(MoEL). Exposure limits for Chemical Substances and Physical Agents (MoEL Public Notice No. 2013-38). 2013
- Occupational Safety and Health Standards, Toxic and Hazardous Substances. Standard No. 1910.1028. OSHA, Retrieved on 2015-5-18
- Ott MG, Norwood SK, Cook RR. The collection and management of occupational exposure data. *Am Statist* 1985;39:432-436
- Pukkla, E., Guo, J., Kyyronen, P., Lindbohm, M. L., Sallmem, M. and Kauppinen, T. : National job-exposure matrices in analysis of census-based estimates of occupational cancer risk. *Scandinavian Journal of Work Environmental Health* 2005;31(2):97-107
- Rajan B, Alesbury B, Carton M, Gerin H. European proposal for core information for the storage and exchange of workplace exposure measurements on chemical agents. *Appl Occup Environ Hyg* 1997;12(1):31-39
- Rosenstock L, Cullen MR, Brodtkin CA, Redlich CA. *Textbook of clinical occupational and environmental medicine*. 2nd ed. Elsevier Saunders, Philadelphia. 2005
- Statistics Korea, Korean Standard Industrial Classification (KSIC), 9th revision, 2008