

벤젠

대한산업보건협회 산업보건환경연구원 / 임성국, 최아름, 안선희

서론

허용기준 대상물질 13종 중 벤젠(Cas No. 71-43-2, C_6H_6 , MW=78.11, BP=80.1°C)은 방향족 화합물의 기초가 되는 가장 간단한 방향족 탄화수소이며 벤졸(benzole)이라고도 하며, 무색의 휘발성이 강한 인화성 액체이며 향기로운 냄새가 난다.¹⁾

1845년에 A.W. Hoffman과 C. Mansfield가 콜타르에서 추출한 경유(light oil)에서 벤젠을 발견하였으며, 1849년에 콜타르에서 벤젠을 회수하는 기법을 Mansfield가 보고하였다. 그 후 콜타르가 가장 큰 벤젠의 생산원료가 되었다. 뒤이어 벤젠은 석탄가스에서도 확인되었으며, 석탄가스 경유에서 회수하게 되었다. 1940년대까지 주로 석탄의 파괴적 증류를 통하여 얻은 경유에서 벤젠을 추출하였다.²⁾ 벤젠은 부피면에서 가장 생산량이 많은 유기화합물이며, 전 세계적으로 미국이 생산량이 가장 많다.³⁾ 1995년 미국에서 벤젠 생산량은 부피로 볼 때 16번째로 생산량이 많은 화학물질이다.⁴⁾ 우리나라의 벤젠 생산량은 1970년 4,020톤, 1992년 1,171,995톤, 2010년 6,586,110톤으로 1970년대에 비해 약 1,600배가량 증가한 것으로 나타났다.^{5), 6)}

벤젠의 직업적 노출은 벤젠을 생산, 취급하거나 벤젠과 그 유도체를 원료로 사용하는 과정에서 일어난다. 벤젠을 사용하는 석유화학근로자, 실험실 종사자, 합성접착제 제조업자, 염료생산자, 인쇄공(특히 윤전 그라비아 인쇄공), 신발 가죽 또는 고무제품 및 가구공장에서 합성접착제를 사용하는 근로자, 페인트 도장공, 가솔린 저장소나 주유소 근무자 등이 벤젠에 노출될 위험성이 크며, 특히 보수-유지, 세척, 시료추출, 대량운송 공정에서 고농도 노출이 발생하며,⁷⁾ 근로자들에게 주로 노출되는 경로는 피부접촉, 눈, 호흡기 등 점막에 주로 노출이 된다.⁸⁾

현재 벤젠에 대해 우리나라 산업안전보건법에서는 작업환경측정물질(측정주기 6개월), 노출기준 설정 물질, 허용기준 대상물질, 특별관리물질, 특수건강진단물질(진단주기 6개월)로 분류하여 관리하고 있다.

고용노동부의 작업환경 노출기준은 TLV-TWA 1 ppm(3 mg/m³), TLV-STEL 5 ppm(16 mg/m³)이며, 미국산업위생전문가협회(American Conference of Government Industrial Hygienist, ACGIH)에서는 TLV-TWA 0.5 ppm(1.6 mg/m³), TLV-STEL 2.5 ppm(8 mg/m³), 미국연방 직업안전보건국(Occupational Safety and Health Administration, OSHA)에서는 PEL 1 ppm, STEL 5 ppm, 미국 국립산업안전보건연구원(National Institute of Occupational Safety and Health, NIOSH)은 TLV-TWA 0.1 ppm, TLV-STEL 1 ppm으로 규정하여 관리하고 있다.

벤젠은 장기적으로 노출될 경우 범혈구감소증, 백혈병, 혈소판감소증 등의 다양한 혈액 질환을 유발하는 것으로 알려져 있으며, 고농도로 노출될 경우 중추신경계에 영향을 줄 수 있다. 주요 표적 장기는 조혈기계이며 벤젠의 노출로 인한 영향으로 말초혈액의 구성성분에 변화가 일어난다. 벤젠은 자극성 물질로 작용하는데, 인체 발암성이 확인된 물질이다. 몸에서 대사되어 에폭 사이드가 되어 암을 유발한다. 벤젠에 단기 노출될 경우, 9~12g을 섭취하면 구토, 갈지자걸음, 빠른 심장박동, 졸음, 의식상실, 섬망이 나타난 후에 화학적 폐렴과 허탈, 그리고 중추신경계 흥분 후의 중추신경계억제 등이 나타날 수 있다. 중간농도에서는 창백한 얼굴, 현기증, 흥분이 나타난 후에 얼굴 붉힘, 호흡곤란, 가슴조임, 두통, 쇠약 등이 나타날 수도 있다. 10,000~20,000 ppm의 고농도 벤젠 노출은 5~10분 정도의 짧은 시간에도 사망에 이를 수 있다. 300~3,000 ppm의 벤젠을 흡입하면 두통, 어지러움, 졸음, 어지럼, 섬망(delirium), 진전, 의식상실 등이 나타난다고 보고되고 있으며, 고농도 노출 시에는 구역과 마비, 그리고 혼수가 올 수도 있다. 발암성 구분은 우리나라 고용노동부 1A, IARC에서는 Group 1, ACGIH에서는 A1으로 구분되어 있다.

본 연구에서는 허용기준 대상물질 13종 중 벤젠의 노출빈도(업종별, 공정별)와 높은 농도에 노출되는 업종·공정을 파악하고 국내·외 관련문헌을 고찰하여 노출현황을 파악함으로써 근로자의 작업환경개선을 위한 근거자료로 활용하고자 한다.

연구 방법

1. 조사 대상 및 항목

본 연구의 자료출처는 2004~2011년까지 대한산업보건협회 작업환경측정 자료이며, 측정 대상의 업종,

공정에 대해 조사를 실시하였다.

2. 업종 및 공정 분류

업종의 분류는 한국표준산업분류를 기준으로 분류하였다. 구분 수준은 중분류로 하였으며, 61개의 업종으로 구분하여 평가를 실시하였다. 공정의 분류는 안전보건공단에서 제공하는 표준공정분류표를 기본으로 하였으며, 공정은 35개종으로 나누어 평가하였다.

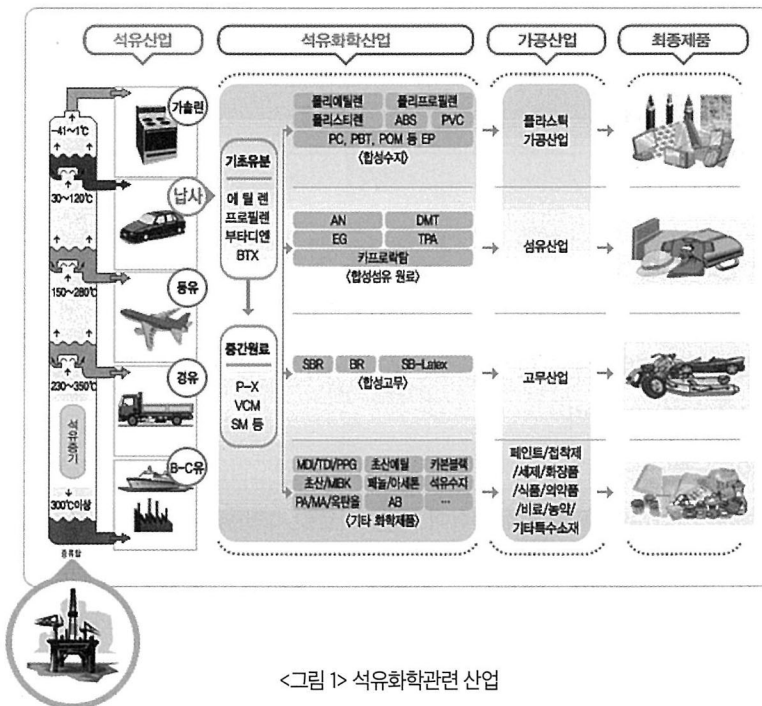
3. 통계적 분석

통계분석은 2001~2011년까지 허용기준 대상물질 13종의 작업환경측정자료를 Microsoft Excel 2010, IBM SPSS 21.0을 이용하여 빈도분석, 교차분석을 실시하였다.

연구 결과 및 고찰

1. 발생업종, 공정 및 노출경로

벤젠은 많은 업종에서 노출이 되지만, 특히 석유화학산업과 관련된 업종에서 많은 노출이 일어나고 있다<그림 1>.



<그림 1> 석유화학관련 산업

석유화학산업은 크게 상류와 하류 석유화학산업으로 나눌 수 있다. 상류 석유화학산업은 유류와 가스를 개발, 생산, 수집, 처리, 시장으로 이동하는 모든 과정을 포함하고 있으며 이 산업은 크게 탐사, 드릴, 원유와 천연가스, 중유처리, 타르 샌드, 송유관으로 구분할 수 있다. 하류 석유화학산업으로는 정제, 선박 및 궤도차 선적, 탱크로리 운송, 주유소, 코크스로 산업, 차량수리, 항공산업, 소방 등이 있으며 각각의 노출경로와 노출수준은 아래 <표 1>과 같다.

<표 1> 벤젠 발생 업종, 공정 및 발생경로 (국외 문헌)

석유화학산업 구분	발생 공정 및 산업	발생 직종	평균 노출 농도범위 (ppm)	참고 문헌
상류	탐사, 드릴, 원유와 천연가스, 중유처리, 타르 샌드, 송유관	기술요원, 현장기사	0.01~0.19	9)
	정제	조작자, 보수 관리자, 실험실 요원	0.07~0.1	10)
하류	선박과 궤도차 선적	부두 노동자, 갑판원, 선박의 가교 노동자	~83.1	11~12)
	탱크로리 운송	조작자, 운전자, 선적	0.11~2.56	13)
	주유소	주유원	0.03	14)
	코크스	코크스 관련 종사자	0.04~0.55 (중앙값)	15)
	차량 수리	정비공	0.01~0.81 (범위)	16~20)
	항공 산업	정비사	0.08 (중앙값)	21)
	소방	소방관	~ 21.2 (범위)	22)

2. 업종별 노출 빈도 현황

벤젠의 업종별 분포 특성을 살펴보면 가장 많은 노출 빈도를 나타낸 것은 화학물질 및 화학제품 제조업(의약품 제외)이었으며, 다음으로 코크스-연탄 및 석유정제품 제조업, 자동차 및 트레일러 제조업, 연구 개발업 등의 순으로 나타났다.

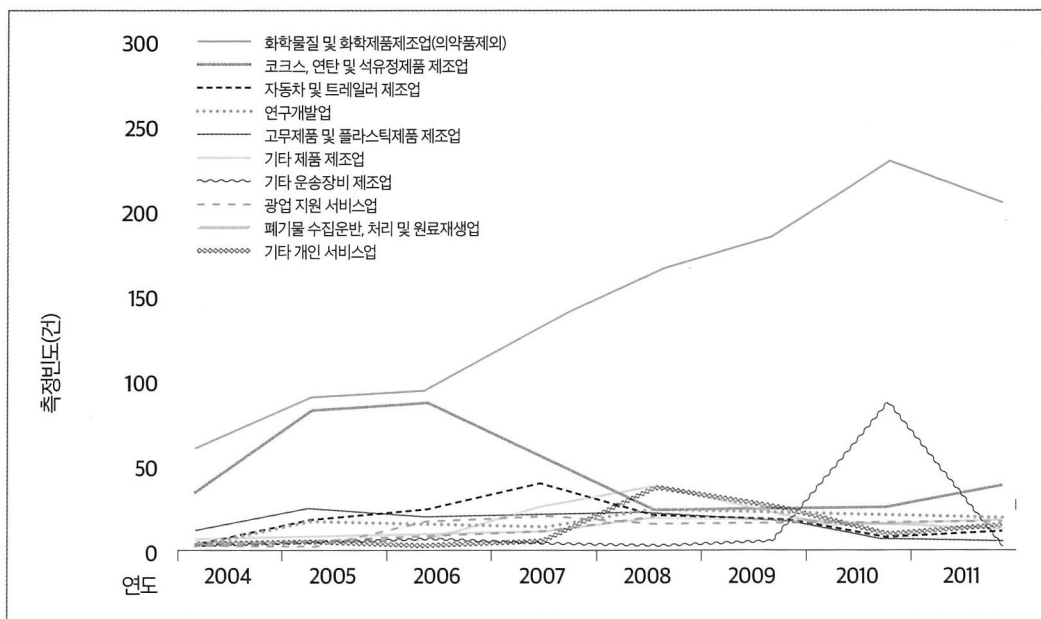
벤젠이 가장 많이 노출되는 업종인 화학물질 및 화학제품 제조업은 주로 화학제품, 비료, 유화, 수지 등을 만드는 업체로 대다수의 공정에서 노출이 되는 것으로 나타났으며, 그 중 검사, 준비, 반응 등의 공정은 노출 빈도가 높은 것으로 나타났다. 코크스-연탄 및 석유정제품 제조업은 주로 정유, 정제, 저유소 등이었으며, 이러한 업종 역시 다양한 공정에서 노출이 되었다. 그 중 높은 빈도의 노출을 보이는 공정은 검사, 운반, 정제, 준비 등이었다(표 2).

박동욱 등(2013)의 연구에서 벤젠의 노출 빈도가 높은 업종(세세분류)은 석유화학계 기초화학물질 제조업, 원유 정제처리업, 기타 분류 안 된 화학제품 제조업 등의 순으로 나타났으며 이러한 업종들은 모두 화학물질 및 화학제품 제조업과 코크스-연탄 및 석유정제품 제조업(대분류)에 속하는 것으로 본 연구와 비슷한 결과로 나타내었다.²³⁾

<표 2> 벤젠의 노출빈도가 높은 업종

순위	업종명	순위	업종명
1	화학물질 및 화학제품 제조업(의약품 제외)	6	기타 제품 제조업
2	코크스, 연탄 및 석유정제품 제조업	7	기타 운송장비 제조업
3	자동차 및 트레일러 제조업	8	광업 지원 서비스업
4	연구 개발업	9	폐기물 수집운반, 처리 및 원료재생업
5	고무제품 및 플라스틱제품 제조업	10	기타 개인 서비스업

벤젠이 노출되는 주요 업종(10종)별 연도에 따른 측정 빈도의 추이를 살펴보면 화학물질 및 화학제품 제조업(의약품 제외)이 2010년까지 꾸준한 증가세를 보이다가 2011년에 소폭 감소하는 것으로 나타났고, 코크스-연탄 및 석유정제품 제조업의 경우 2006년까지 증가세를 보이다가 2006년 이후 감소하는 것으로 나타났다. 기타 운송장비 제조업의 경우 2010년에 노출빈도가 높은 것으로 나타났으며, 이러한 경향을 나타낸 것은 일부 사업장의 측정이 추가된 것으로 생각되며, 나머지 업종은 연도에 따라 큰 변화가 없는 것으로 나타났다(그림 2).



<그림 2> 연도별 벤젠의 측정 시료 수(개)의 변화

3. 공정별 노출 빈도 현황

벤젠의 노출 빈도가 가장 높은 공정은 준비 공정이었으며, 투입, 압연압출, 연마 등의 순으로 나타났다. 준비공정의 경우 주로 화학물질 및 화학제품 제조업(의약품 제외), 연구 개발업, 코크스·연탄 및 석유정제품 제조업 등의 업종이었으며, 투입공정은 주로 소매업(자동차 제외), 화학물질 및 화학제품 제조업(의약품 제외), 창고 및 운송관련 서비스업 등의 업종에서 노출이 되는 것으로 나타났다(표 3).

<표 3> 벤젠의 노출빈도가 높은 공정

순위	공정명
1	준비
2	투입
3	압연압출
4	연마
5	성형
6	용접
7	접착
8	조립
9	열처리
10	도금

4. 노출농도가 높은 업종 및 공정

벤젠의 노출기준(1 ppm)을 초과한 업종과 공정은 소매업(주유소) 중 주유 작업이 가장 많았으며, 가죽·가방 및 신발 제조업 중 투입공정과 기타 개인 서비스업(산업용 세탁업)순으로 나타났다. 주유소에서 노출되는 경로는 주로 저장탱크에 휘발유 등을 채우거나 자동차의 연료탱크 주유 시, 탱크 내의 휘발성 증기는 외부로 배출하게 되는데 이때 주유보조원이나 자동차 운전자들이 노출될 수 있다. 주유소와 관련된 연구에서 7개의 주유소를 대상으로 벤젠의 농도를 측정된 결과 개인 노출농도는 0.003 ~ 0.20 ppm, 지역 시료의 농도는 0.004 ~ 0.57 ppm으로 나타났으며, 최근 셀프 주유소의 확산으로 주유보조원 뿐만 아니라 자동차 운전자의 노출이 예상되며 이에 대한 관리가 필요하다.²⁴⁾

관리농도(Action Level, 노출기준의 0.5배)이상이며 노출기준을 초과하지 않는 업종과 공정을 살펴보면, 화학물질 및 화학제품 제조업 중 준비/투입/검사/반응 공정이 가장 높은 빈도를 나타냈으며 고무제품 및 플라스틱제품 제조업 중 투입/도장도포 공정, 자동차 및 트레일러 제조업 중 준비/성형/용접/도장도포 공정 등의 순으로 나타났다(표 4).

<표 4> 벤젠의 노출농도가 높은 업종 및 공정

순위	업종명	공정명	노출수준 [†]
1	소매업(자동차 제외)	주유	a
2	가죽, 가방 및 신발제조업	주입	a
3	기타 개인서비스업	도장	a
4	화학물질 및 화학제품 제조업 (의약품 제외)	준비/투입/검사/반응	b
5	고무제품 및 플라스틱제품 제조업	투입/도장도포	b
6	자동차 및 트레일러 제조업	준비/성형/용접/도장도포	b
7	금속가공제품 제조업 (기계 및 가구 제외)	성형/접착/도장도포	b
8	창고 및 운송관련 서비스업	투입/저장	b
9	섬유제품 제조업(의복 제외)	세척제거	b
10	코크스, 연탄 및 석유정제제품 제조업	준비	b
11	비금속광물제품 제조업	반응	b
12	기타운송장비 제조업	정제	b
13	소매업(자동차 제외)	투입	b
14	전문 서비스업	검사	b

† : 노출수준 = 노출농도/노출기준, a: 노출기준의 1.0배 초과 b: 노출기준의 0.5~1.0배 이하

5. 관련 문헌 고찰

국내에서 발표된 벤젠과 관련된 문헌을 살펴보면, 주유소와 관련된 문헌에서의 기하평균 노출 농도는 0.09 ~ 0.18 ppm, 석유·석탄 화학과 관련된 문헌에서의 기하평균농도는 0.1 ~ 0.11 ppm로 나타났다. 석탄·석탄 화학과 관련된 업종에서 기하평균농도는 낮은 수준이었지만, 측정대상 중 노출기준(1 ppm)을 초과한 건수는 각각 32건(7.3%), 14건(3.2%)으로 나타났다.^{24), 25)}

접착테이프 제조업, 인조피혁 제조업, 페인트 제조업, 인쇄업과 관련된 문헌에서 벤젠의 노출농도의 기하평균은 0.7~12.2 ppm으로 높은 농도에 노출되는 것으로 나타났으며,²⁴⁻²⁶⁾ 주유소와 석유·석탄 화학과 관련된 사업장에서의 평균노출지수(평균노출농도/노출기준)는 0.09~0.18로 나타난 반면, 접착테이프 제조업, 인조피혁 제조업, 페인트 제조업, 인쇄업과 관련된 사업장에서의 평균노출지수는 0.7~12.2로 최대 노출기준의 12배가 넘는 수준이었다. 비록 1990년대 문헌이기는 하나 과거의 노출이 심각한 점을 고려할 때, 이와 관련된 업종 근로자들에 대한 꾸준한 관리가 필요할 것이다.

<표 5> 벤젠과 관련된 국내 문헌에서의 노출 수준

업종/공정	대상자	GM(GSD) [†] (ppm)	평균 노출 지수 [‡]	참고 문헌
주유소	6	0.18	0.18	24)
주유소	7	0.09	0.09	24)
석유화학	202	0.10±5.62	0.1	25)
석탄화학	238	0.11±6.32	0.11	25)
접착테이프 제조	13	12.2(2.0)	12.2	26)
인조피혁 제조	7	2.5(1.6)	2.5	26)
페인트 제조	19	1.6(4.5)	1.6	26)
인쇄업	21	0.7(3.9)	0.7	26)

†AM : Arithmetic mean, SD : Standard deviation, GM : Geometric mean, GSD : Geometric Standard deviation

‡ : 평균노출지수 = 평균측정농도/노출기준(1 ppm)

결론

본 연구는 허용기준 대상물질 13종 중 벤젠의 노출빈도(업종별·공정별)와 높은 농도에 노출되는 업종 및 공정을 파악하고 국내 관련문헌 고찰을 통해 노출현황을 파악함으로써 근로자의 작업환경개선을 위한 근거자료로 활용하고자 하며 주요 결과는 다음과 같다.

1. 벤젠의 노출 빈도가 가장 높은 업종은 화학물질 및 화학제품 제조업(의약품 제외)이었으며, 코크스·연탄 및 석유정제품 제조업, 자동차 및 트레일러 제조업, 연구 개발업 등의 순으로 나타났다.
2. 노출빈도가 높은 주요 업종(10종)의 연도별 빈도분석 결과, 화학물질 및 화학제품 제조업(의약품 제외)은 꾸준한 증가세를 보였고, 코크스·연탄 및 석유정제품 제조업의 경우 2006년까지 증가세를 보이다가 2006년 이후 감소하는 것으로 나타난 반면 타 업종들은 연도에 따라 큰 변화가 없는 것으로 나타났다.
3. 노출빈도가 높은 공정은 준비, 투입, 압연압출, 연마 등의 순이었으며 준비 공정이 많은 업종은

화학물질 및 화학제품 제조업, 연구 개발업, 코크스·연탄 및 석유정제품 제조업 등의 업종인 것으로 나타났다.

4. 노출기준(1 ppm)을 초과한 업종과 공정은 주유소에서 주유작업, 가죽·가방 및 신발 제조업 중 주입공정, 기타 개인 서비스업(산업용 세탁업)인 것으로 나타났으며, 관리농도(Action Level, 노출기준의 0.5배)이상이며 노출기준을 초과하지 않는 업종과 공정은 화학물질 및 화학제품 제조업 중 준비/투입/검사/반응 공정이 가장 높은 빈도를 나타내었다.
5. 국내 벤젠 관련 연구에서 공기 중 벤젠의 기하평균농도는 0.09 ~ 12.2 ppm으로 나타났으며, 특히 접착테이프 제조업, 인조피혁 제조업, 페인트 제조업에서는 기하평균농도가 노출기준을 초과하는 것으로 나타났다.

이상의 연구결과로 벤젠의 노출빈도가 높고, 높은 농도에 노출되는 업종과 공정을 파악하였다. 벤젠은 발암성 물질로 작업환경에서 근로자 노출에 대한 관리가 더욱 요구되며 특히, 노출기준을 초과하는 업종과 공정에 대해서는 더욱 철저한 관리가 필요하다. 본 연구결과를 향후 작업환경측정 및 근로자 건강관리에 참고자료로 활용할 수 있기를 기대한다. ☺

참고문헌

1. 정규철. 산업중독편람. 신광출판사. 474-478, 1995
2. Kirk-Othmer. Encyclopedia of Chemical Technology. 4th ed. Volumes 1: New York, NY. John Wiley and Sons, 1991-Present, p. V4(92). 73
3. Gerhartz, W. (Ed). Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. 5th ed. Vol A1: Deerfield Beach, FL: VCH Purblishers, 1985 to Present p. VA3 (85) 477
4. Lewis RJ, Sr (1997) Hawley's Condensed Chemical Dictionary. 13th ed. New York, NY: John Wiley & amp; Sons, Inc, pp123
5. 대한통계협회. 한국통계연감. 서울 : 대한통계협회, 1992.
6. 환경부, 2010년도 화학물질 배출량 조사결과 보고서. 2012
7. 강종원, 김현, 송재철, 김기영, 장은철. 화학물질 노출기준 개정 연구-벤젠. 고용노동부, 2005
8. 노영만, 김치년 등. 작업환경 허용기준 도입을 위한 유해물질 선정 및 허용기준수준에 관한 연구. 안전보건공단 2008
9. Verma DK, Johnson DM, McLean JD. Benzene and total hydrocarbon exposures in the upstream petroleum oil and gas industry. J. Sci. Occup. Environ. Health Saf, 16, 225-263. 2000
10. Concawe(1993~1998) A Review of European gasoline exposure data for period, Concawe, Brussels, Belgium. 2000
11. Sherwood RJ. Evaluation of exposure to benzene vapour during the loading of petrol. Br J Ind Med. 29, 65-69, 1972
12. Concawe Review of the European oil industry exposure data 1986-1992. Concawe, Brussels, Belgium. 1994
13. Capleton AC, Levy LS. An overview of occupational benzene exposure and occupational exposure limits in Europe and North America. Chemo-Bio Interactions. 153-154, 43-53. 2005
14. Merlo DF, Bertazzi PA, Bolognesi C, et al. Exposure to low levels of benzene, interindividual biological variability and cancer risk: A multicentre European study. Istituto Nazionale per la Ricerca sul Cancro, Milan, Italy. 2001
15. Horz P, Carbonnelle P, Haufroid V, et al. Biological monitoring of vehicle mechanics and other workers exposed to low concentrations of

- benzene. Arch. Occup. Environ. Health. 70, 29-49. 1997
16. Concawe. Review of the European oil industry benzene exposure data. Concawe, Den Haag, The Netherlands. 1986
 17. HELA. Occupational exposure to benzene in MVR workshops. Health and Safety Executive/Local Authorities Enforcement Liaison Committee, London, UK. 2000
 18. Nordlinder R, Ramnäs O. Exposure to benzene at different work place in Sweden. Ann Occup Hyg. 31, 345-355. 1987
 19. Popp W, Rauscher D, Müller G, Angerer J, Norpoth K. Concentrations of benzene in blood and S-phenylmercapturic and t,t-muconic acid in urine in car mechanics. Int Arch Occup Environ Health. 66, 1-6. 1994
 20. Javelaud B, Vian L, Molle R, et al. Benzene exposure in car mechanics and road tanker drivers. Int Arch Occup Environ Health. 71, 277-283. 1998
 21. Egeghy PP, Hauf-Cabalo L, Gibson L, Gibson R, Rappaport SM. Benzene and naphthalene in air and breath as indicators of exposure to jet fuel. Occup Environ Med. 60, 969-976. 2003
 22. Jankovic J, Jones W, Burkhart J, Noonan G. Environmental study of fire fighters. Ann Occup Hyg. 35, 581-602. 1991
 23. 박동욱, 강동목, 김수근, 윤충식, 최상준, 하권철. 벤젠의 과거노출추정(Job-Exposure Matrices, JEM) 연구. 안전보건공단 2013
 24. 송상환, 백남원, 하권철. 국내 일부 주유소 내에서의 휘발성 유기화합물 노출에 관한 연구. 한국산업위생학회. 10(1), 58-73, 2000
 25. 석유 및 석탄화학의 대보수작업 중 벤젠노출 특성 비교, 정은교 등, 한국산업위생학회지, 20(3), 147-155, 2010
 26. 벤젠폭로 근로자의 환경평가 및 생물학적 모니터링기법 개선에 관한 연구. 차철환 등, 대한산업의학회지, 6(1), 122-133, 1994