

모작업장에서 휘발성 유기오염물질의 분석과 근로자들의 건강위해성 평가

이효민, 김명수, 최시내, 윤은경, 박종세¹

한국과학기술연구원 도핑컨트롤센터, 식품의약품 안전본부 독성연구소¹

= Abstract =

Health Risk Assessment and Analysis on the Volatile Organic Compounds in Some Workplace

Hyomin Lee, Myungsoo Kim, Shinai Choi, Eunkyung Yoon, Jongsei Park¹

Korea Institute of Science and Technology, Doping Control Center,

Korea Food and Drug Administration, National Institute of Toxicology Research¹

This study was conducted to assess the health risk on the volatile organic compounds such as toluene, xylene, and styrene in painting workplace. It was monitored through personal air sampling during working time in selected 5 workplaces and analysed using gas chromatography. For the settlement of exposure situation, there were regarded working conditions such as working hours, yearly working days, and working years. Also, Monte-Carlo simulation was used for the induction of hazard index using toxicity value from IRIS(Integrated risk information system) database. The results of risk assessment were summarized as follows :

1. The air concentration of toluene was 7.096 ± 15.644 ppm, 2.586 ± 4.276 ppm for xylene, 1.914 ± 5.320 ppm for styrene in blast painting workplaces. The level of toluene was different significantly compared with the level of xylene and styrene.

2. Computed chronic daily intake values of 95th percentile on toluene, xylene and styrene treated by Monte-Carlo simulation were 9.616, 3.567, 2.782 mg/kg/day, respectively.

3. Computed hazard index values of 75th percentile on toluene, xylene and styrene treated by Monte-Carlo simulation were 3.5, 1.0 and 1.6, respectively.

Adverse health effects on the toluene, xylene and styrene would be expected by working exposure in selected 5 workplaces since the hazard indices of three compounds were exceeded 1 in the surroundings of 75th percentile though having the low emerged frequency.

Key words : Health risk, Monte-Carlo simulation, Chronic daily intake, Hazard index

I. 서 론

작업장 환경의 경우는 유기용제, 중금속류 그리고 기타 유독물질의 사용으로 인하여 일반 실내환경과 달리 특정오염물질의 오염도가 높을 수 있다.

국내 작업장의 환경관리는 ACGIH(American Conference of Governmental Industrial Hygienists)의 TLVs(Threshold Limit Values)를 근거로 한 노동부의 산업안전보건법에 의해 관리되고 있으나 작업장에서 근무하는 대다수 근로자의 경우 단일 오염물질이 아닌 복합오염물질에 동시에 노출되고 있으며, 그 인체 노출경로도 오염물질의 물리·화학적 성질에 따라 호흡노출, 피부흡수, 경구노출 등이 가능하며, 매일 동일한 작업환경에서 일정시간 장기간의 반복노출은 보건학적인 측면에서 관리되어야 한다.

TLVs는 대다수의 근로자가 건강장해를 받지 않고 매일 반복하여 노출될수 있는 공기중 유해물질의 농도로 정의되고 있으나, 극소수 근로자의 경우, 기존의 질병상태가 악화되거나 직업병으로 발전하여 심각한 영향을 받을수 있고 또한 개인의 물질별 감수성에 대한 차이가 있으므로 일부근로자의 경우, TLVs 이하에서도 유해영향이 발현될수 있다고 지적하고 있다. 이처럼 TLVs는 소수민감그룹을 고려한 값이 아님을 언급하고 있고, 이 값은 안전농도와 위험농도를 정확히 구분하는 경계선이 아님을 강조하고 있다(ACGIH, 1994).

공기중 유해물질의 체내안전 흡수량으로 부터 8시간 노출, 시간당 호흡률 등을 이용하여 TLVs 허용농도를 설정하는 Paustenbach(1985)의 방법은 안전흡수량 산출시, human variability와 같은 불확실성계수들을 고려하지 않아, 상대적으로 높은 안전흡수량을 유도하게 되고, U. S. EPA (1989a) 방법의 경우 체내 안전 흡수량 산출시 만성노출에 대한 개념과 human variability 등의 불확실성 계수들을 고려하므로 상대적으로 낮은 안전흡수량을 유도하게 되는데, U. S. EPA에서 제시하는 이 값을 Reference Dose (RfD)라고 하며 일반적으로 U. S. EPA (1989b) 방법은 노출상한수준

(upper-bound level) 을 측정하는 것을 기본으로 하고 있다. 본 연구의 의의는 도장작업을 하는 5곳의 작업장에서 주로 쓰여지고 있는 휘발성유기오염물질 toluene, xylene, styrene에 대한 복합노출을 고려하여 U. S. EPA(1989a,b,c) 방법에 따라 만성일일노출량을 구하고 그 값을 평생 일일 허용노출량에 해당하는 RfD 값과 비교하므로 안전수준여부를 평가하고자 하는 것이다.

작업장에서 사용하는 유기용제들은 대부분이 휘발성 유기오염물질들로서 사용도중 쉽게 확산되어 공기중으로 전이되고, 이들의 분해시간이 비교적 짧다고 하더라도, 연속적인 사용과 작업장의 환기조건이 부적절한 경우 휘발성 유기오염물질들이 작업장 공기중에 고농도로 존재할 수 있다. 휘발성 유기오염물질들의 대부분은 증기압이 높아 상온의 환경중에 노출되는 즉시 휘발되어 공기중에 존재하게 되며 특히, 실내공기에서는 분해시간이 지연된다. 작업장환경에서 가장 중요한 인체노출경로는 호흡을 통한 노출이며 작업행태에 따라 피부침투를 통한 노출과 경구노출도 가능하다.

Toluene은 동물실험에서 호흡노출시 신경손상을 나타내는 것으로 보고되고 있으며(ATSDR, 1992), 흰쥐에서 임신중 호흡노출시 태아의 골격형성 장애 및 형태학적 기형이 유발되는 것으로 보고되었고(Hudak과 Ungvary, 1978), 마우스의 경우 경구섭취시 구개열과 함께 태아의 치사율이 증가되는 것으로 보고되고 있다(Nawrot과 Staples, 1979). 역학자료에 의하면, 5년간의 직업적 노출을 경험한 남성에게서 뇌세포위축, 정신장애, 시각장애, 청각장애등이 보고되고 있다(Lazar등, 1983).

Xylene의 경우, 실험동물에서 고농도 노출시 태아독성을 나타내는데, 이는 모체독성과 상관성을 갖는 것으로 보고된 바 있고(Ungvary등, 1980), 고농도 노출시 구개열 등 태아의 기형이 나타났으며(Mark 등, 1982), 호흡에 의한 직업적 인체노출시 진전, 불면증, 우울증 등 중추신경계의 손상과 백혈병 등의 혈액독성 그리고 간장 및 신장의 손상이 일부 보고되고 있다

(ATSDR, 1990; IARC, 1989).

Styrene은 흰쥐 수컷에서 고농도 경구투여시 교환의 퇴화와 정자형성에 영향을 미치는 것으로 보고되고 있으며(Srivastava 등, 1989), toluene, xylene과 달리 micronucleus test와 in vivo에서의 cytogenetics, Ames test, *Drosophila* SLRL test, *S. cerevisiae* gene conversion 등에서 styrene의 돌연변이원성이 알려지고 있다(NIOSH, 1984; IARC, 1986). Styrene은 두통, 피로, 현기증, 권태와 비정상적인 EEGs, 반응시간 지연 등의 임상적 증세등 중추신경계 이상이 동물실험 및 역학자료를 통해 증명되어졌으며, 이 밖에도 폐와 간장 기능에 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다(NIOSH, 1994). 역학자료에 의하면 23ppm-70ppm 수준의 노출시 인체내 스테로이드계 호르몬 균형에 이상이 생겨 뇨중 17-ketosteroid 농도가 증가하는 것으로 보고되고 있으며, 98ppm 수준의 노출시는 안구 및 기도 상부점막의 자극이 알려지고 있다(Stewart 등, 1968; Chmielewski 등, 1978).

본 연구에서는 도장작업을 하는 5곳의 작업장을 대상으로 개인 공기포집장치(personal air sampler)를 이용하여 시료를 채취함으로써 toluene, xylene 그리고 styrene의 작업장 공기오염수준을 파악하였고, 근로자들의 작업경력 등을 근거로 노출시간, 노출빈도, 노출기간 등의 변수들을 설정하였으며, Monte-Carlo simulation을 통해 오염도자료의 분포값과 체중, 호흡율과 같이 분포값 적용이 가능한 노출변수를 이용하여 U. S. EPA (1989b) 방법에 따라 복합노출 상한수준을 계산하였고, 노출값과 RfD 치의 비(위험지수)를 구하므로 해당물질의 유해영향 기대여부를 평가하였다.

II. 연구방법

1. 시료채취방법

도장작업을 하는 5곳의 작업장을 대상으로 1곳당 4명~11명의 근로자들에게 개인 공기포집장치(personal air sampler; Ametek Alpha-2 와 SKC 222-3)를

착용하게 하여 총 43개의 시료를 얻었다. 개인공기포집장치의 charcoal tube를 대상자의 호흡기 위치에 고정시켜 1회당 120분에서 200분간씩 2회 포집하였으며, 이때의 유량은 0.2L/min으로써 약 24L에서 40L 정도의 공기를 통과시켜 유기용제를 활성탄 튜브에 채취하였다. 포집 후 활성탄 튜브 앞과 뒤를 플라스틱 뚜껑으로 봉한 뒤 실험실로 옮겨 분석하였다.

2. Toluene, Xylene 및 Styrene의 분석

근로자들의 개인포집을 통해 얻어진 활성탄 튜브의 가운데를 절단하여 앞층의 활성탄 100mg과 뒤층의 활성탄 50mg을 마개 달린 시험관에 옮긴 후 이황화탄소를 1ml를 가하여 30분간 방치한뒤 활성탄에 흡착된 유기용제를 용출시켜 이 중 1 μ l를 gas chromatograph(Hewlett Packard HP5890 Series II)에 주입하여 분석하였다. 이 때 칼럼은 BP-20M(50m \times 0.25mm i. d.) 캐필러리 Carbowax 칼럼을 사용하였고, FID검출기로 검출하였다. Carrier gas는 질소를 1ml/min으로 조정하였고, split ratio는 100:1로 하였으며 주입부 온도는 200 $^{\circ}$ C, 검출기 온도는 250 $^{\circ}$ C, 그리고 칼럼 오븐 온도는 38 $^{\circ}$ C에서 8분 유지한 후 15 $^{\circ}$ C/min으로 10분간 승온후 188 $^{\circ}$ C에서 2분간 유지하였다.

3. 작업노출 변수설정

IRIS(1995)를 통한 물질별 독성정보검색과 근로자들의 작업조건을 고려하여, 인체노출경로를 파악하였으며, 근로자들의 작업경력 등을 근거로 노출시간, 노출빈도, 노출기간 등의 변수들을 설정하였다.

4. 인체노출평가

경로별 인체노출량 계산을 위하여 U. S. EPA(1989b)의 기본 수식을 이용하였으며, Crystal Ball $^{\circ}$ 의 fitting program을 통해 toluene, xylene, styrene의 오염도 분포값을 활용하였고, 체중, 호흡율, 평균수명, 작

업복 착용시 피부노출면적 등의 노출변수들은 U. S. EPA(1989b)의 maximum reasonable exposure value 들을 평균값으로 하고, 근로자들의 다양한 체격조건에 의한 체중, 호흡율, 피부노출면적들의 차이를 고려하기 위하여 $\pm 10\%$ 범위의 분포값을 활용함으로써, 인체노출량의 계산시 Monte-Carlo simulation(Crystal Ball®, 1996)을 통한 물질별 인체노출량의 percentile 값으로 구하였다.

Monte-Carlo simulation은 오염도 자료와 노출변수들의 분포값을 고려하므로 point value 사용의 오류와 상한 노출값 및 최대오염도자료 사용으로 발생할수 있는 노출의 비현실적 추정을 줄이는데 목적이 있다 (Price등, 1996 ; Helton과 Shiver, 1996).

5. 독성값의 유도

IRIS(1995) 정보검색을 통해 U. S. EPA에서 평가한 toluene, xylene, styrene의 위험등급을 파악하여 U. S. EPA에서 제안하고 있는 독성자료를 선택사용하였으며, 개개물질의 독성자료에서 제시하고 있는 NOAEL (No Observed Adverse Effect Level)값과 불확실성 상수(Uncertainty factor)를 써서 독성값 RfD를 유도하였다.

6. 위험지수 계산

U. S. EPA(1989c)에서 제안하고 있는 비발암물질의 위험지수 계산방법을 적용하였으며 위험지수 도출시 Monte-Carlo simulation(Crystal Ball®, 1996)을 통한 percentile 값을 구하였다.

7. 통계학적 검정

도장작업시 작업장 공기중의 주요오염물질 파악을 위하여 물질별 농도비교에 ANOVA를 이용하였고, 개개 오염도 자료는 Crystal Ball®(1996)의 fitting program 을 사용하여 분포형태를 결정한 후 simulation에 적용

하였다.

III. 연구결과 및 고찰

1. 작업장의 toluene, xylene 및 styrene

작업장의 대기 시료 분석법의 validation은 정확도와 검량선의 상관계수로 하였으며, 표 1에 보여준바와 같이 정확도는 1ppm농도에서 %상대 표준편차(relative standard deviation; RSD)로 측정된 결과는 toluene은 9.6%, xylene은 18.3%, styrene은 3.9%로 양호하였다.

Table 1. Determined precision and linear ranges

Chemicals	Precision	Linear range
	at 1 ppm(%RSD)	ppm (r ; correlation coefficient)
Toluene	9.6	0.1 -20(0.987)
Xylene	18.3	0.01-10(0.988)
Styrene	3.9	0.01-10(0.958)

* Precision data calculated from single injection of triplicate samples of standards

* Linear range determined that points in calibration curve.

작업장 5곳에서 채취된 시료 43개의 물질별 오염도 자료를 살펴보면 toluene의 오염도가 평균 7.096 ppm 으로 가장 높았고, xylene, styrene의 오염수준은 2.586 ppm, 1.914 ppm 정도였다.

물질별 오염도 분포는 toluene은 log normal distribution, xylene 은 gamma distribution, styrene 은 weibull distribution 형태를 보였다. 작업장별 오염도 비교시 유의한 차이를 나타내지 않아 5곳에서 채취된 시료 43개를 모두 합하여 물질별로 농도차이를 비교하였다.

Table 2. Levels of pollution in workplace air assuming half the detection limit for the nondetects

Chemical	Air concentration (ppm)		
	Mean ± S.D	Minimum	Maximum
Toluene	7.096 ± 15.644 ^a	0.005	99.820
Xylene	2.586 ± 4.276 ^b	0.005	21.920
Styrene	1.914 ± 5.320	0.005	30.590

(n=43)

^a : P<0.05, different with xylene and styrene

^b : P<0.05, different with styrene

2. 인체노출량 계산

작업장 근로자들의 노출변수를 표 3과 같이 하루 8시간 근무, 년 280일 근무, 근무연수를 15년으로 설정하여, 호흡노출량과 물질별 피부침투계수를 활용한 피부흡수량을 계산하였다.

Table 3. Human exposure values and equations used in exposure quantification

Human exposure factor	Value	Reference
Body Weight (kg)	70	(U. S. EPA, 1989b)
Surface Area (m ²)	0.1 ^a	(U. S. EPA, 1989b)
Inhalation rate(m ³ /day)	20	(U. S. EPA, 1989b)
Exposure Frequency(day/year)	280	yearly 280 working day
Exposure Time(hr/day)	8	daily 8 hours
Exposure Duration(year)	15	15 years(assumed value)
Average Time (day)	5475	equal to exposure duration(U. S. EPA, 1989b)

^a Clothed with long-sleeved shirt, pants, shoes (U. S. EPA, 1989b)

* Inhalation :
(U.S.EPA, 1989b) $Ca \times \frac{IR}{BW} \times \frac{ET \times EF \times ED}{AT}$

* Dermal Uptake :
(U.S.EPA, 1989b) $Ca \times \frac{SA}{BW} \times Kp \times \frac{ET \times EF \times ED}{AT}$

Ca : Concentration in air (mg/m³)

IR : Inhalation rate (m³/day)

ET : Exposure time (hr/week)

ED : Exposure duration(year)

EF : Exposure frequency (week/year)

SA : Surface area(m²)

AT : Averaging time (days)

Kp : Permeability to skin(cm/hr)

- Toluene : 1.11×10^{-3} (California EPA, U.S.A, 1993)

- Xylene : 2.27×10^{-3} (California EPA, U.S.A, 1993)

- Styrene : 1.69×10^{-3} (California EPA, U.S.A, 1993)

인체노출량 계산시 물질별 오염도 분포값과 20m³/day의 호흡율, 70kg의 체중, 그리고 0.1m²의 노출 체표면적에 대한 ±10%범위의 분포값을 활용하여 계산한 Monte-Carlo simulation의 기본개념은 그림 1과 같다.

일반적으로 인체노출평가에서 접촉율의 계산은 유용한 95th percentile의 통계값을 사용하는 것을 원칙으로 하고 있으나, 95th percentile 값이 유용치 않으면 90th percentile 값이 쓰여질수 있다. 호흡율의 경우는 U. S. EPA(1985)를 통해 실내와 실외의 거주시간을 고려하여 활동수준에 따른 여성과 남성 그리고 어린이에 대한 호흡율에 대해 보고된 바 있으나, 유용한 95th percentile 값은 알려지지 않고 있다. 이 보고서에서는 단지, 특별한 활동패턴이 알려지지 않았을 때 계속적인 노출상황의 평가에 기준이 되는 성인 평균 1일 호흡율로서 20m³/day을 제안하고 있고 worst case 호흡율 계산을 위해서는 20m³/day의 1.5배인 30m³/day를 쓰도록 언급하고 있다. 본 연구에서는 호흡노출량 평가를 위하여 20m³/day를 선택 활용하였다.

노출빈도와 노출기간의 설정은 총노출시간을 계산하기 위하여 쓰여지는데, 이 변수는 경우에 따라 결정되어진다. 이 변수 또한 통계수치가 유용하면, 노출시간에 대한 95th percentile 값을 사용하지만, 그렇지 않을 경우는 reasonable conservative 추정치를 사용한다. U. S. EPA(1986b) 경우는 한 거주지역에서의 개인별 90th percentile 값(upper-bound value) 또는 50th percentile 값을 평가에 사용하고 있다.

체중은 노출기간에 대한 평균체중을 의미한다. 만일 노출이 유년기에 발생하였다면 유년기의 평균체중

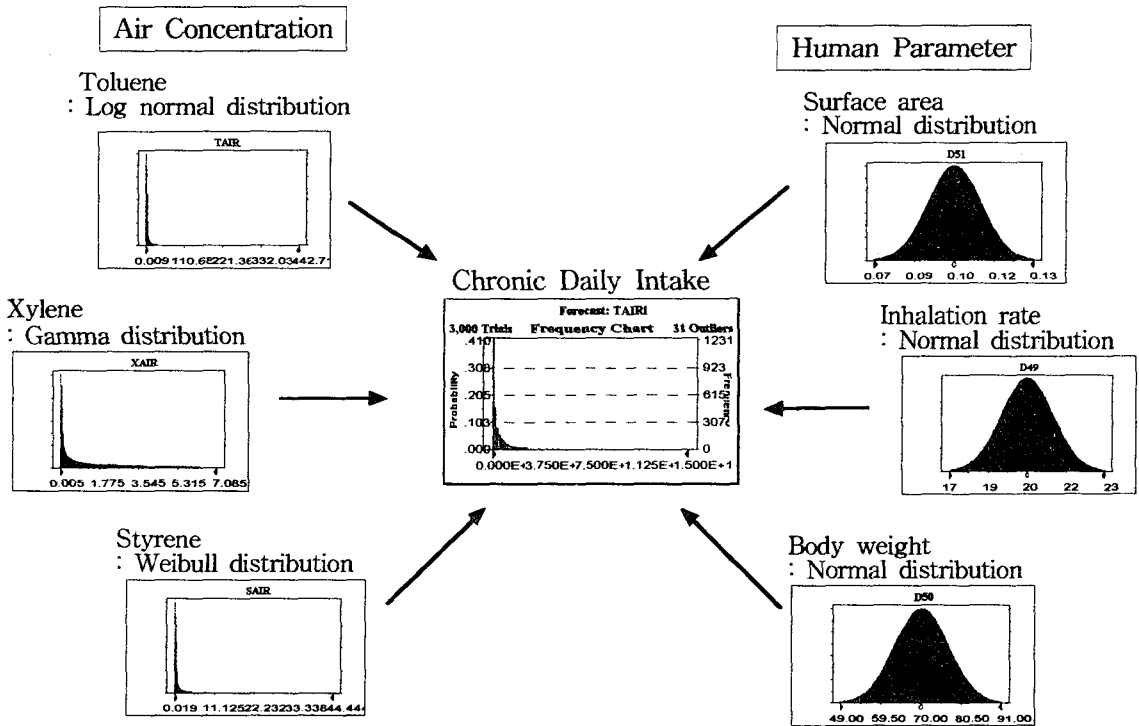


Fig. 1. Human parameters and individual pollutant data regarded in quantification of chronic daily intake in Monte-Carlo simulation

이 쓰여져야 한다. 따라서 토양섭취와 같은 평생노출을 고려할 때 모든 연령그룹에 대한 시간가중평균치를 취해야 한다. 그러나 체중에 대한 접촉율 비(ratio)가 평생 매우 일정할 경우 70 kg의 체중을 사용한다. 노출기간에 대한 일정한 체중을 관례적으로 쓰고 있는데 그 이유는 체중이 노출수식에서 관여된 다른 변수에 항상 의존적이기 때문이다. 그러나 일정한 체중 상수를 취해서 사용하므로 이러한 의존성에 의해 발생하는 오류는 최소화될 수 있다. 평균체중이 노출수식에서 다른 변수들과 연결될 때 RME(Reasonable Maximum Exposure)의 가장 적절한 계산을 초래할 수 있다. 즉, 예를 들어 5th percentile값의 체중과 95th percentile값의 접촉율이 연결될 때 가장 소수 그룹의 사람들이 가장 높은 량의 섭취를 하게 된다는 있음직하지 않은 상황 때문에 “reasonable”이라는 용어는 이

럴 경우 고려할 수 없다. 또한 상호보완적으로 95th percentile 값의 체중과 95th percentile 값의 섭취가 연결될 경우도 소수그룹의 사람들이 보다 더 큰 체중에 대한 접촉율의 비를 취할 수 있기 때문에 이럴 경우 “maximum”이라는 용어를 고려할 수 없는 것이다.

AT(Average time)은 평가대상물질의 독성효과양상에 의존적으로 선택되는데 예를 들어, 발생독성에 대한 인체노출평가는 노출사건(즉, 하루 혹은 1회노출발생)에 대한 평균에 의해 계산되어지고, 급성독성물질의 경우는 효과를 나타낼 수 있는 가장 짧은 노출기간에 대한 평균에 의해 계산되어진다. 비발암물질에 대한 장기적인 노출을 평가할 때, 노출은 노출기간(아만성 혹은 만성일일노출량)에 대한 평균노출을 써서 계산하고, 발암물질의 경우는 평생(만성일일노출량 혹은 평생평균 일일노출량)에 대한 총 누적 용량의 할당에

의해 계산한다. 이러한 이유로 U. S. EPA에서는 비발암물질의 경우 AT를 노출기간과 동일하게 적용하고, 발암물질의 경우는 기대수명 70년을 적용하고 있다(U. S. EPA, 1989c). 이것은 각 물질별 작용기전이 다르다는 과학적인 견해를 고려한 것으로서, 발암물질일 경우 짧은 기간에 대한 고용량 노출은 평생동안의 분산된 저용량의 노출과 상응한다는 가정에 기초한 것이다(U. S. EPA, 1986). 따라서, 본 연구의 대상물질들은 모두 비발암 물질들이므로 AT를 노출기간과 동일한 15년, 5475일로 고려해서 계산하였다.

Monte-Carlo simulation을 통해 구해진 인체노출량의 percentile 값은 toluene의 호흡노출량 경우 50th percentile, 95th percentile 값이 5.495×10^{-1} , 9.616 mg/kg/day 로 비교적 큰 차이를 나타내었고, 호흡량과 피부노출량의 95th percentile값은 매우 큰 차이를 나타내어 그 비가 대체로 $1:10^{-6}$ 정도로 호흡량이 월등히 많았다.

그러나 본 연구에서 계산된 피부노출량은 작업자들이 긴셔츠와 바지, 신발 등을 착용하고 있을 것을 가정하여 계산한 값이어서 이보다 노출면적이 커질 경우 인체노출량은 상대적으로 더 커질 것으로 예측되나 여전히 호흡노출량에 비해서는 적을 것으로 생각된다.

Table 4. Percentile values of chronic daily intake by individual chemical produced by Monte-Carlo simulation

Pathway	Percentile	Chronic daily intake(mg/kg/day)		
		Toluene	Xylene	Styrene
Inhalation	5th	3.041×10^{-2}	2.122×10^{-3}	6.266×10^{-3}
	25th	1.634×10^{-1}	4.401×10^{-2}	1.777×10^{-2}
	50th	5.495×10^{-1}	2.883×10^{-1}	9.226×10^{-2}
	75th	1.795	1.022	4.782×10^{-1}
	95th	9.616	3.567	2.782
Dermal Uptake	5th	3.949×10^{-8}	5.787×10^{-9}	1.260×10^{-8}
	25th	2.187×10^{-7}	1.181×10^{-7}	3.569×10^{-8}
	50th	7.233×10^{-7}	7.848×10^{-7}	1.885×10^{-7}
	75th	2.427×10^{-6}	2.782×10^{-6}	9.756×10^{-7}
	95th	1.257×10^{-5}	9.827×10^{-6}	5.729×10^{-6}

Toluene, xylene, styrene에 대한 인체노출량의 크기를 비교하면 toluene, styrene, xylene 순이고, 이것은 작업장 오염도에 주로 기인한 것으로서 toluene의 오염도가 styrene, xylene보다 통계적으로 유의하게 높아 그에 따른 인체노출량도 더 높은 것으로 생각된다.

3. 독성값의 활용

Toluene, xylene 그리고 styrene의 위험등급은 IRIS (1995)에 의하면 toluene, xylene은 D group(Not classified as to human carcinogen)으로, styrene은 C group(Possible human carcinogen)으로 분류되고 있어 독성값 유도시 비발암물질의 평가방법을 적용하여 RfD 값을 구하였다(표 5).

여기서 RfD값은 유해영향을 나타내지 않는 lifetime dose로서 개별적인 동물실험을 통해 알려진 NOEL값과 동물자료를 인체자료로 외삽시키는 과정에서 고려되는 불확실성 계수를 적용해주므로써 구한 것이다. RfD값에 대한 구체적인 의의를 살펴보면 RfD값은 평생동안, 인체에 해로운 약간의 risk도 없다고 판단되는 인구집단(민감그룹을 포함한)에 대한 일일노출량을 의미한다.

일반적으로 U. S. EPA(1987)에서 정해서 사용하고 있는 불확실성 계수들은 활용하는 독성자료의 평가에 따라 10에서 10⁵까지의 불확실성 계수 적용이 가능하고, 일부 물질들은 1~10 범위에서 설정되는 modifying factor가 추가되기도 한다. 본 연구에서는 toluene과 styrene의 경우, human study에 의한 역학자료의 LOAEL 값을 이용하였고(U. S. EPA 1987; NIOSH, 1984), xylene의 경우, U. S. EPA의 health advisory에 제시된 mixed(o-, m-, p-) xylene의 NOAEL값을 사용하였다.

Table 5. Toxicity datas needed in induction of reference dose

	Toluene	Xylene (mixed)	Styrene
NOAEL	375mg/m ³ (LOAEL)	357. 14mg/m ³	215mg/m ³ (LOAEL)
Uncertainty factor	210 (Use of occupational exposure level : 4.2 Use of LOAEL : 5 Human variability :10)	100 (Human variability :10 From animal to human : 10)	210 (Use of occupational exposure level : 4.2 Use of LOAEL : 5 Human variability :10)
RfD (mg/kg/day)	0.51	1.02	0.29
Species	Human	Rat	Human
Route	Inhalation	Inhalation	Inhalation
Symptom	C. N. S depression	Body weight decrease Hematology	Abnormal EEGs C. N. S. depression
Source	U. S. EPA, 1989	Carpenter, 1975	NIOSH, 1984

C. N. S : Central Nervous System

NOAEL : No Observed Adverse Effect Level

LOAEL : Lowest Observed Adverse Effect Level

RfD = NOAEL or LOAEL/Uncertainty factor

Table 6. Chronic hazard indices for toluene, xylene and styrene

Percentile	Chronic hazard index		
	Toluene	Xylene	Styrene
5th	0.060	0.002	0.002
25th	0.320	0.043	0.061
50th	1.077	0.283	0.318
75th	3.520	1.002	1.649
95th	18.855	3.497	9.592
Total(50th)		1.678	

Chronic Hazard Index =

$$CDI_1/RfD_1 + CDI_2/RfD_2 + \dots + CDI_n/RfD_n$$

Total Exposure Hazard Index =

$$\begin{aligned} & \text{Hazard Index (exposure pathway}_1\text{)} + \\ & \text{Hazard Index (exposure pathway}_2\text{)} + \dots + \\ & \text{Hazard Index (exposure pathway}_n\text{)} \\ & \text{(U. S. EPA, 1989c)} \end{aligned}$$

4. 위험지수 결정

인체노출량평가에서 구해진 호흡노출량과 피부노출량을 합한 percentile 노출량과 참고치를 활용하여 Monte-Carlo simulation에 의한 위험지수 percentile

값을 구하였다.

비발암물질의 경우는 위험지수를 구하여 구해진 위험지수값이 1보다 큰 경우 그 물질의 유해영향이 나타날 우려가 있는 것으로 평가한다(U. S. EPA, 1989c). Toluene의 평가된 위험지수를 살펴보면, 중앙값에 해당하는 50th percentile 위험지수는 1.077 이고 그 이후의 값들은 출현빈도는 낮지만 위험지수가 1을 초과하고 있어 toluene 에 의한 유해영향발생이 우려된다.

Xylene, styrene 의 경우도 75th percentile 이후 값들은 모두 1을 초과하고 있어 역시 출현빈도는 낮다고 하더라도 xylene, styrene에 의한 유해영향 발생이 우려된다. 구해진 위험지수의 분포값들의 형태는 정규분포하지 않고 한쪽으로 치우친 분포형태를 보이고 있어 이들 분포값의 대표값으로는 중앙값을 사용하는 것이 더 타당하다. 복합물질의 노출에 대한 위험지수 산정은 U. S. EPA(1989c)에 따르면 노출경로별 위험지수를 모두 합산하여 그리고 물질별 위험지수를 모두 합산하여 구하도록 제시되어 있다.

각 물질의 위험지수 중앙값을 선택하여 구한 총 위험지수값 역시 1.6으로 1을 초과하였다.

IV. 결 론

도장작업을 주로하는 5개의 작업장을 대상으로, 공기중 toluene, xylene, 그리고 styrene의 농도를 분석하고, 근로자들의 작업조건을 고려한 노출변수를 설정하여 Monte-Carlo simulation을 이용한 만성 일일노출량과 위험지수를 구하므로써 작업장 근로자들의 건강위해여부를 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 작업장 공기중의 toluene, xylene, 그리고 styrene의 농도는 각각 7.096 ± 15.644 ppm, 2.586 ± 4.276 ppm 그리고 1.914 ± 5.320 ppm이었으며, toluene의 농도가 xylene, styrene에 비해 통계적으로 유의하게 높았다.

2. Monte-Carlo simulation에 의해 도출된 toluene, xylene 그리고 styrene의 95th percentile 만성일일노출량은 각각 9.616, 3.567, 2.782 mg/kg/day 이었으며 호흡노출량과 피부노출량의 비는 개략적으로 1:10⁶이었다.

3. Monte-Carlo simulation에 의해 도출된 toluene, xylene, styrene의 75th percentile 위험지수는 각각 3.5, 1.0 그리고 1.6이었다. 이들은 비록 출현빈도는 낮다고 하더라도 위험지수 1을 초과하고 있어 위의 연구대상 작업장에서 종사하는 근로자들의 경우 toluene, xylene, styrene노출에 기인한 유해영향발생이 우려되며 이들중 toluene은 우선적인 관리가 요구된다.

참 고 문 헌

ACGIH(American Conference of Governmental Industrial Hygienists). Threshold limit value for chemical substances and physical agents and Biological Exposure Indices. ACGIH, Cincinnati, Ohio, 1994

ATSDR(Agency for Toxic Substances and Disease Registry). Toxicological profile for total xylenes. U. S. Department of Health and Human Services, 1990.

ATSDR(Agency for Toxic Substances and Disease

Registry). Toxicological profile for toluene. Draft. U. S. Department of Health and Human Services. Agency for Substances and Disease registry, 1992

California EPA. CalTOX: A multimedia total exposure model for Hazardous-waste sites, the office of scientific affairs, Department of Toxic substances control, California Environmental Protection Agency, Sacramento, California, U. S. A., 1993

Carpenter CP, Kinkead ER, Geary DL Jr, Sullivan LJ, King JM. Petroleum hydrocarbon toxicity studies. V. Animal and human response to vapors of mixed xylenes. Toxicology and Applied Pharmacology 1975; 33: 543-558

Chemieleski J, Dolmierski R, Renke W, Kwiatkowski SR. long-term occupational effects of styrene on working people. Gesamte Hyg. Grenzgeb 1977; 23: 639-643

Crystal Ball®. Crystal Ball® Users Guide. Version 4.0, Decisioneering, Inc., 1996: 144-152.

Helton JC, Shiver AW. A Monte-Carlo procedure for the construction of complementary cumulative distribution functions for radioactive waste disposal. Risk Analysis 1996; 16(2) : 43-55

Hudak A, Ungvary GY. "Embryotoxic effects of benzene and its methyl derivatives: Toluene and xylene." Toxicology 1978 ; 11:55-63

IARC(International Agency for Research on Cancer). "Styrene" IARC monographs. suppl. 6, 1986

IARC(International Agency for Research on Cancer). IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Vol. 47. IARC, 1989.

IRIS Integrated risk information system. U. S. EPA, 1995

Lazar RB, Su HO, Melen O, Daghestani AN. Multifocal central nervous system damage caused by toluene abuse, Neurology 1983 ; 33(10) : 1337-1340

Marks TA, Ledoux TA, Moore JA. Teratogenicity of as commercial xylene mixture in the mouse. Journal of Toxicology and Environmental Health 1982 ; 19: 97-105

Nawrot PS, Staples RE. Embryo-fetal toxicity and teratogenicity of benzene and toluene in the mouse, Teratology 1979 ; 19 : 41

NIOSH(National Institute for Occupational safety and

- Health). Criteria for a recommended standard - Occupational exposure to styrene. DHH(NIOSH), 1984; 83-119
- NIOSH(National Institute for Occupational safety and Health). NIOSH pocket guide to chemical hazards, 1994
- Pautenbach DJ. Occupational exposure limits, Pharmacokinetics and Unusual work schedules. In 'Patty's Industrial Hygiene and Toxicology', A Wiley Interscience Publication, N. Y., 1985
- Price PS., Su SH, Harrington JR. Uncertainty and variation in Indirect exposure to Tetrachlorodibenzo-p-dioxin from a beef consumption pathway. Risk Analysis 1996; 16(2) : 263-277
- Srivastava S, Seth PK, Srivastava SP. Effect of styrene administration on rat testis. Archives of Toxicology 1989 ; 63 : 43-46
- Stewart RD, Dodd HC, Baretta ED, Schaffer AW. Human exposure to styrene vapor. Arvh. Environ. Health 1968; 16 : 656-662
- Ungvary G, Tatrai E, Hudak A, Barcza G, Lorincz M, Studied on the Embrotoxic effects of ortho-, meta- and para-xylene. Toxicology 1980; 18: 61-74
- U. S. EPA. Development of statistical distributions of ranges of standard factors used in exposure assessments, EPA/600/8-85-010, 1985
- U. S. EPA. "Guidelines for Carcinogen Risk Assessment", 51 Federal Register 33992, 1986
- U. S. EPA. "Reference dose(RfD) description and use in health risk assessments." Integrated Risk Information System(IRIS). Appendix A, 1987
- U. S. EPA Interim methods for development of inhalation reference doses, EPA/600/8-88/066F, 1989a
- U. S. EPA. Exposure factors handbook, Office of Health and Environmental Assessment. EPA/600/8-89/043, 1989b
- U. S. EPA. Risk assessment guidance for superfund volume I : Human health evaluation manual(Part A). Office of Emergency and Remedial Response. EPA/540/1-89/002, 1989c
-