

화학물질의 건강위험성과 냄새 역치

윤충식¹

¹보건환경연구소, 서울대학교 보건대학원 환경보건학과

Health Hazard and Odor Threshold of Chemicals

Chungsik Yoon¹

¹Institute of Health and Environment, Department of Environmental Health, School of Public Health, Seoul National University

Abstract

Results: Among the 656 chemicals having Korean OELs, 123 chemicals had odor threshold values. There were no correlation ($R^2=0.0036$) between 8-hour Time Weighted Average(TWA) and odor threshold values in 112 chemicals which had both 8-hour TWA and odor threshold values. This fact means that health hazard could not be judged by sense of smell in the workplace or other environment. The classification of the chemicals having odor threshold values into three categories, the ones which had higher odor threshold values than OELs, the ones had lower odor threshold values than OELs and the ones having similar values, could be used to manage chemicals at the workplace. Three chemicals like decaborane(0.05ppm), formaldehyde(0.5ppm), and hydrogen fluoride(0.5ppm) had the same value of 8hr-TWA and odor threshold values. The correlations of odor threshold with vapor pressure ($R^2=0.0024$), with LD_{50} ($R^2=0.0043$), and with LC_{50} ($R^2=0.0025$), were weak. Though it is very difficult to elucidate the relationship between odor threshold and chemical structure or its reactive group, this study showed several structural similarities and reactive groups for chemicals having very low odor threshold values.

Conclusion: This study found that there were no correlation between odor thresholds and health hazards using index such as OELs($R^2=0.06$), LD_{50} ($R^2=0.004$) and LC_{50} ($R^2=0.003$). There was moderate correlation between OELs ($R^2=0.16$) and LD_{50} ($R^2=0.38$), between OELs and LC_{50} ($R^2=0.14$).

keywords: odor, threshold, chemicals, occupation, exposure limit, Lethal dose, Lethal concentration, TWA

Introduction

최근 국내에서는 가슴기 살균제와 하청업체의 메탄올 중독사고로 인한 화학물질관리에 대한 관심이 매우 높아지고 있다. 실제로 화학물질의 사용은 일부 소비자 사용도 있지만 대부분 작업장에서 이루어진다. 화학물질의 위험성이란 폭발, 화재 같은 안전성 측면과 장기적 노출, 급성 노출로 인한 보건적 측면, 사업장의 울타리를 벗어나게 되면 지역사회 노출로 인한 주변 환경 오염, 생태계 파괴, 지역주민 건강영향 등을 고려한 환경적 측면의 위험성이다. 지역주민의 건강영향도 엄밀하게 보면 보건문제로 간주될 수도 있다. 따라서 화학물질의 안전한 관리란 이러한 안전적 측면, 보건적 측면, 환경적 측면의 위험성을 파악하고 감소시키는 것이라고 할 수

있다. 이러한 개념은 실제로 GHS 시스템 (globally harmonized system of classification and labeling of chemicals)에서 분류하는 건강 유해성(health hazards), 물리적 위험성(physical hazards), 환경지표유해성(environment hazards)과 밀접히 연관되어 있다[1].

그러나 화학물질을 취급하는 작업자 입장이나 화학물질을 사용하는 사업장 주변의 주민에게는 이러한 위험성과 더불어 냄새(통상 주민은 악취라고 부름)를 더 문제 삼기도 한다. 왜냐하면 화학물질의 객관적 성질은 작업자나 주민이 전문적 지식이 없으면 파악하기 어렵지만 냄새는 쉽게 파악되기 때문이다. 또한 작업자나 주민이 어떤 화학물질에 대한 전문적 지식이 있다고 해

* Corresponding author: Chungsik Yoon (csyoon@snu.ac.kr, 02-880-2734)

도 실제 노출되고 있는 수준에서의 각 특성을 파악하기는 어렵다.

후각 신경을 통해 감지하는 각 개인의 인지는 화학물질이 갖고 있는 객관적 성질 (예, 증기압, 독성)과 다르다는 것이 알려져 있지만 통상 이는 몇 가지 화학물질의 예를 통해 설명되어질 뿐 체계적으로 분석된 바가 없다. 산업보건영역에서도 작업자 교육을 할 때 냄새와 노출기준은 상관성이 없다고 이야기하지만 실증적이고 체계적인 자료는 없다.

따라서 본 논문의 목적은 국내 산업안전보건법에서 직업노출기준이 설정되어 있는 화학물질을 대상으로 이물질들의 냄새 역치와 노출기준 또는 다른 독성 정보(LC₅₀, LD₅₀)의 상관성을 파악하는 것이다.

Methods

작업자에 대한 노출 기준 설정물질 목록은 고용노동부 홈페이지에서(<http://www.moel.go.kr>) 다운로드 받았다. 가장 최근 개정된 2013년 8월 개정된 “화학물질 및 물리적 인자의 노출기준(고용노동부고시 제2013-38호)”을 기준으로 하였다. 해당 자료는 국가법령정보센터에서(<http://www.law.go.kr>)에서도 이용 가능하다. 이 물질들의 물리화학적 특성, 발암성 및 독성 정보 등은 CAS No.를 기준으로 하여 2015년 1월 기준으로 산업안전보건법의 경우 안전보건공단(<http://kosha.or.kr>) 물질안전보건자료(material safety data sheet, MSDS)를 기준으로 하였으며 자료가 일부 불충분한 하거나 없는 경우는 구글에서 검색하였다[1].

냄새역치(odor threshold, OT)인 경우 MSDS에 누락된 경우가 많았는데 이는 미국 산업위생학회에서 발간한 냄새역치 전문서적(1997)의 자료를 이용하였다[2]. 이들 자료를 모아 엑셀 기반 데이터베이스를 구축하여 자료 분석을 하였다.

냄새 역치가 있는 화학물질에 대해 비교할 물리적 특성은 증기압, 성상, 분자량 및 일부 물질에 대해서는 포함된 원소 성분(예, 황성분)을 이용해 분석하였고, 건강지표로는 8시간 노출기준인 TWA, 단시간 노출기준인 STEL, LD₅₀(median lethal dose), LC₅₀(median lethal concentration)와의 상관성을 보았다. 물질의 존재형태(고체, 액체, 기체)에 따른 특성을 비교할 때는 자료의 분포가 정규분포 하는지, 대수

정규분포 하는지 Shapiro and Wilk Test 검정을 하여 그 결과를 표시하였고 평균(표준편차), 기하평균(기하표준편차)를 모두 표시하였다.

Results

산업안전보건법에 노출기준이 있는 화학물질의 수는 다른 이름으로 인한 중복된 수를 제외하면 656개 화학물질에 달한다(박지훈 등, 2015). 작업환경노출기준은 8시간 시간가중평균치(8hr-time weighted average, TWA), 단시간노출기준 (short term exposure limit, STEL), 천정값 (ceiling Value, C)로 구분되는데 모든 물질이 이들 기준을 갖고 있는 것이 아니라 각각 596종, 120종, 34종이 갖고 있다. 그림 1은 이를 표시한 것으로 STEL이 있는 120개 물질은 모두 TWA를 갖고 있으나 C를 갖고 있는 물질은 1개(불화수소)를 제외하고는 TWA가 없다[3].

656개 물질 중에서 냄새 역치를 갖고 있는 물질은 123개(18.8%)이다. 이중 노출기준(TWA 기준)과 냄새역치를 모두 갖고 있는 물질은 112개로 노출기준 설정물질 656개 대비 17%이고 냄새기준이 있는 물질 123개 대비 90%이다. 이들의 상관관계는 그림 2와 같다($R^2=0.16$). 냄새역치와 STEL을 모두 갖고 있는 57개 물질의 상관성도 높지 않아서($R^2=0.12$) 단순히 냄새의 유무만 갖고 건강 영향을 논의하는 것은 타당하지 않다고 할 수 있다.

그림 2에 표시한 화학물질 명은 TWA와 냄새역치가 낮거나 또는 높은 물질 또는 벤젠, 포름알데히드, 산화에틸렌처럼 발암성 물질에 대해서 나타낸 것이다. 그림 2에서 대각선($y=x$)상단의 물질은 노출기준이 냄새역치보다 낮은 물질로 이미 냄새를 지각하였다면 노출기준을 초과하였다고 판단할 수 있는 물질이다. 예를 들어 천식 유발이나 감각 물질로 잘 알려져 있는 톨루엔-2,4-디이소시아네이트, 톨루엔-2,6-디이소시아네이트(TDI)는 노출기준이 0.005 ppm인데 비해 냄새역치가 모두 0.05 ppm으로 노출기준이 10 배정도 낮은 물질로 이런 물질은 냄새가 나면 이미 노출기준을 초과하고 있다고 판단할 수 있다. 1,1-디클로로에틸렌, 클로로에틸렌, 산화에틸렌은 각각 냄새역치가 500 ppm, 250 ppm, 50 ppm으로 각각의 TWA인 5 ppm, 1 ppm, 1 ppm보다 매우 높은 냄새역치를 갖고 있다.

대각선 하단의 물질은 역으로 노출기준에

비해 냄새역치가 낮은 물질로 노출기준 이하에서도 냄새를 지각할 수 있는 물질이다. 예를 들어 트리메틸아민, 요오드포름, 2-에톡시에틸아세테이트 (이명, 셀루솔브아세테이트), 에틸렌글리콜모노에틸 아세테이트), 에탄에티올, 디메틸아민의 냄새역치가 각각 0.00021, 0.00039, 0.00056, 0.00076 ppm으로 0.001ppm이하로 매우 낮으나 이들의 TWA는 요오드포름은 0.6ppm, 다른 물질은 모두 5 ppm으로 냄새역치에 비해 노출기준이 요오드포름은 1,500배, 다른 물질은 5,000 배이상 높다.

대각선상에 있거나 대각선에 가까운 물질은 노출기준이 냄새역치와 비슷한 물질들이다. 정확히 노출기준과 냄새역치가 동일한 물질은 3 가지로, 데카보란, 포름알데히드, 불화수소로 데카보란은 냄새역치와 노출기준이 모두 0.05ppm 이고 포름알데히드와 불화수소는 모두 0.5 ppm 으로 동일하다.

이들 냄새역치와 노출기준을 모두 갖고 있는 물질을 성상별로 구분하면 고체가 11개 물질, 기체가 20개 물질, 액체가 81개로 대부분 액체 물질로 존재한다. 이들의 물질의 성상에 따른 비교를 표 1에 요약하였다.

표 1에서 보듯이 자료의 분포는 일부는 대수 정규분포를 하였고(예, 고체상의 냄새역치, TWA, 증기압, 가스상의 냄새역치, TWA), 일부는 정규분포나 대수정규분포를 하지 않았으나 (예, 가스상 물질의 증기압, 액상 물질의 냄새역치, TWA, 증기압) 이들도 정규분포보다는 대수 정규분포에 가까웠다. 표에서 보듯이 고체, 기체 액체 순으로 냄새역치의 기하평균이 각각

0.043 ppm, 0.236 ppm, 2.84 ppm으로 증가하고 냄새역치의 중앙값도 각각 0.053 ppm, 0.31 ppm, 4.68 ppm으로 증가한다. 반면에 고체, 가스, 기체의 증기압은 각각 0.11 mmHg, 923.13 mmHg, 12.05 mmHg로 가스상물질이 가장 높고, 다음 액상, 기체순서이다.

고체상의 냄새역치의 기하평균이나 중앙값이 낮은 이유는 실제로 많은 고체 중에서 냄새를 나게 하는 화학물질의 수가 제한되는데 비해 이들의 냄새역치는 대부분 낮은 값(0.00039~3 ppm)을 갖고 있는 반면에 가스나 액체는 화학물질의 수가 많으며 냄새역치의 범위가 크기 때문이다. 기체 성분의 휘발성의 기하평균은 4390.13 mmHg로 고체나 액체에 비해 훨씬 크 에도 불구하고 휘발성과 냄새와 상관성이 있는 지는 이 표만으로는 정확히 해석하기 어렵다.

노출기준의 기하평균은 가스, 고체, 액체 순으로 높아지는데 각각 1.09 ppm, 2.21 ppm, 10.99 ppm으로 액체가 가장 높게 평가되는데 이는 액체 중에서 실제로 냄새가 있는 화학물질이 많고 이들의 노출기준이 다양하고 높은 물질이 존재하기 때문이다. 액상으로 되어 있는 물질의 노출기준은 0.005~1,000ppm으로 가스상이나 고체상에 비해 넓음을 알 수 있다.

냄새역치와 노출기준이 있는 112개중 물질중 증기압자료가 없는 1개 물질(디메틸벤젠)을 제외한 111개 물질의 증기압과 냄새역치의 관계는 그림 3과 같다. 그림에서 보듯이 냄새역치와 증기압과의 상관성 계수는 0.0024로 상관성이 없었다.

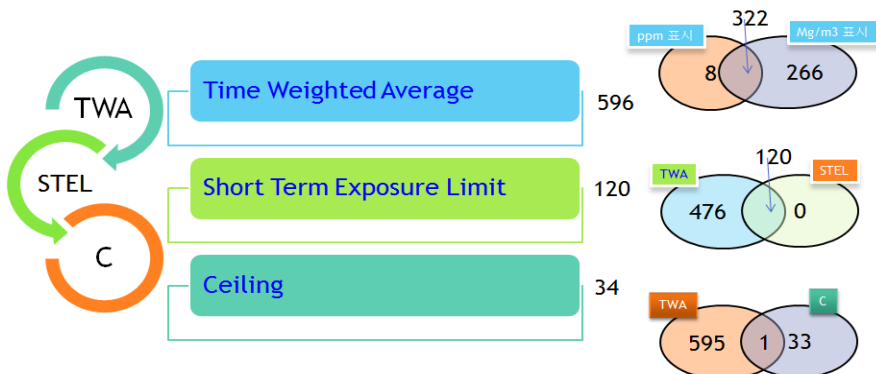


Figure 1. Number of chemicals having occupational exposure limits like TWA, STEL, C in Korea (윤충식, 2016).

Health hazard and odor threshold

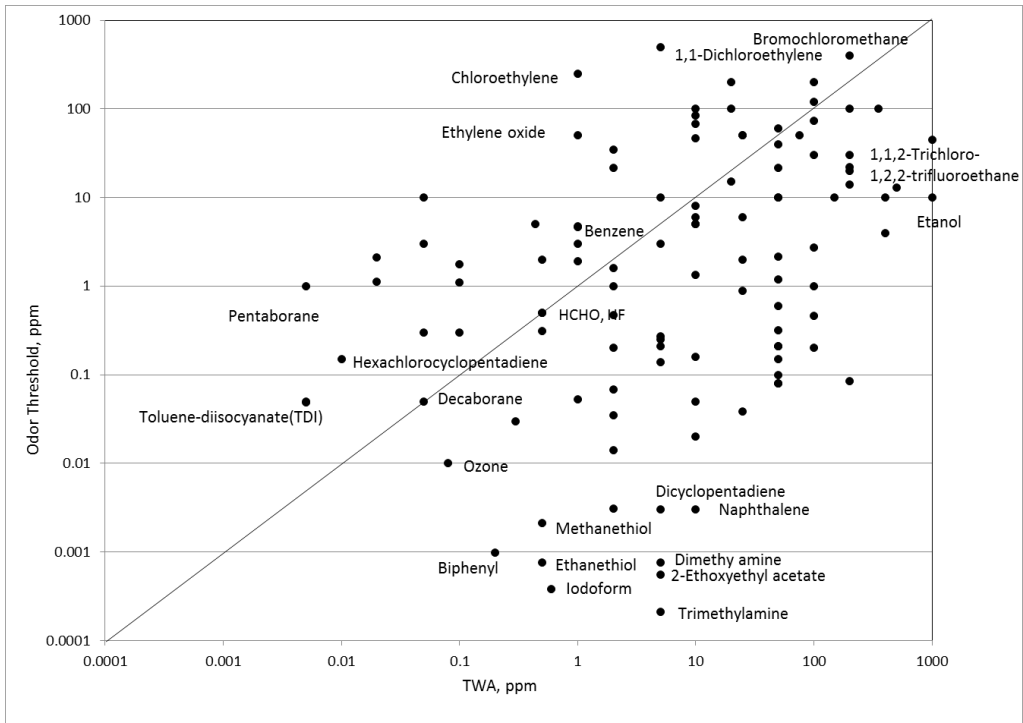


Figure 2. Relationship between occupational exposure limits(8hr-TWA) and odor threshold. Chemicals above diagonal line have higher odor threshold than 8hr- TWA. Chemicals below diagonal line have lower odor threshold than 8hr-TWA.

Table 1. Comparison of odor threshold, occupational exposure limit and vapor pressure of chemicals according to the physical status

		Physical Status at room temperature		
		Solid	Liquid	Gas
No. of Chemicals		11	81	20
Odor Threshold, ppm	GM (GSD)	0.043 (22.82)	2.84(19.65)	0.236(36.79)
	AM(SD)	0.58(0.98)	33.75(78.47)	16.45(56.11)
	Median	0.053	4.68	0.31
	Range	0.00039~3	0.00056~500	0.0002~250
Vapor Pressure, mmHg	GM (GSD)	0.11 (33.11)	12.05 (17.60)	923.13(19.87)
	AM(SD)	3.56 (9.01)	88.17(161.26)	4390.13(6922.81)
	Median	0.19	15.68	1897.50
	Range	0.0005~30	0.00002-902	0.0498~29300
TWA, ppm	GM (GSD)	2.205(6.21)	10.99(18.96)	1.09 (7.26)
	AM(SD)	7.81(14.45)	87.08(176.93)	5.63(11.92)
	Median	2.00	25.00	1.00
	Range	0.1~50	0.005~1000	0.05~50
Molecular Weight, Mean(SD)		146.48(86.18)	105.79(48.75)	47.85(21.94)

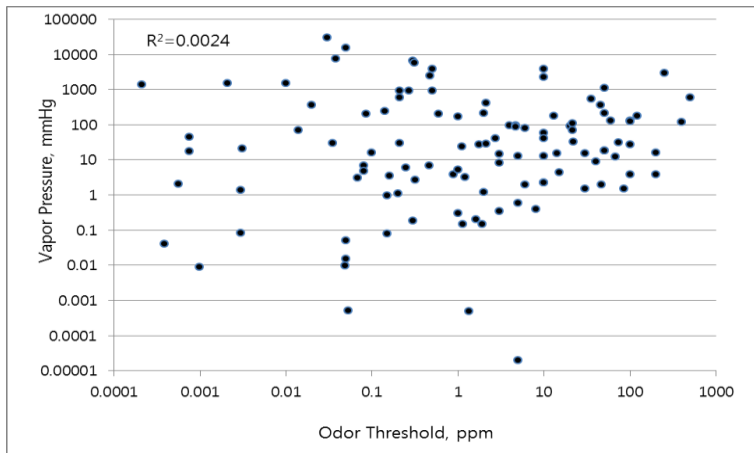


Figure 3. Relationship between vapor pressure and odor threshold.

Health hazard and odor threshold

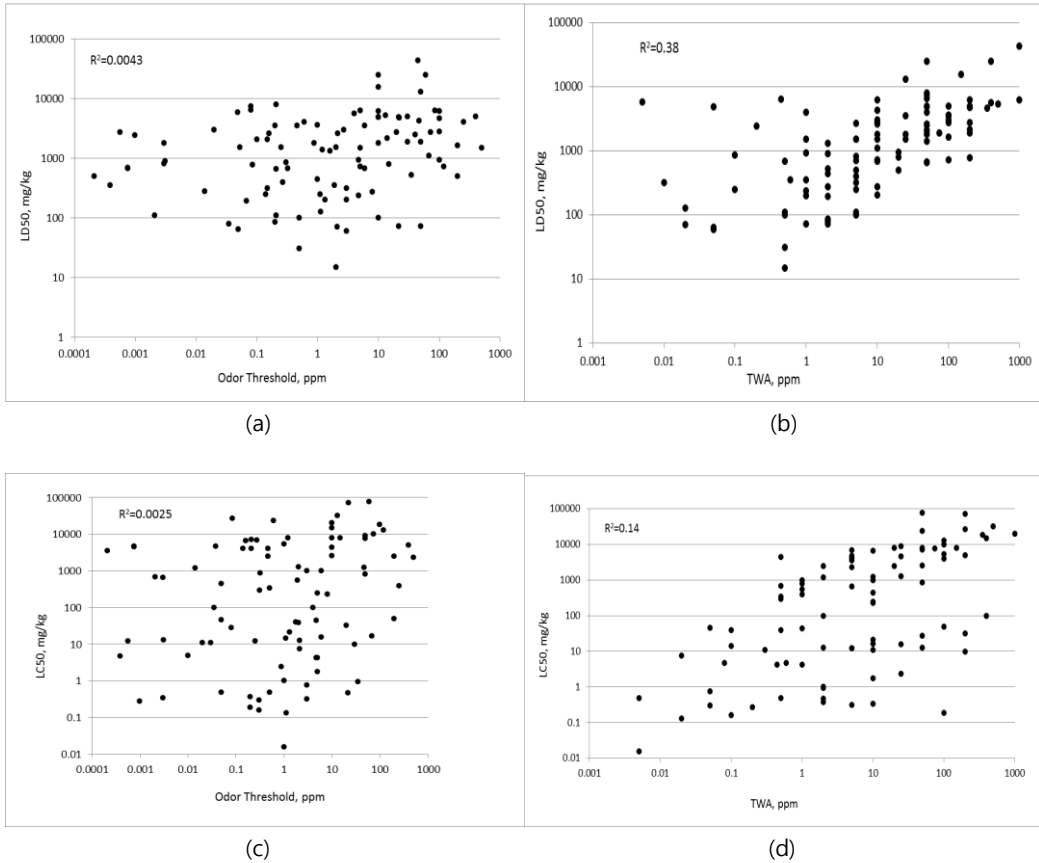


Figure 4. Relationships of chemicals' LD₅₀ and LC₅₀ with odor threshold or occupational exposure limit. (a) : Odor threshold and LD₅₀(101 chemicals), (b) : Occupational exposure limit and LD₅₀(101 chemicals), (c) : Odor threshold and LC₅₀(100 chemicals), (d) : Occupational exposure limit and LC₅₀(100 chemicals).

그림 4는 노출기준 TWA와 냄새 역치를 갖고 있는 화학물질 중에서 LD₅₀ 또는 LC₅₀자료가 있는 물질에 대하여 그 상관성을 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 냄새역치와 LD₅₀와의 상관성은 매우 낮은 반면(상관성 계수0.0043) LD₅₀와 노출기준과의 상관성은 0.38로 어느 정도 상관성이 있는 것으로 나타났다. 냄새역치와 LC₅₀의 상관성도 매우 낮게 나타난 반면에 노출기준과 LC₅₀의 상관성은 0.14로 LD₅₀보다는 낮지만 어느 정도 경향성을 보이고 있다. 작업장의 노출기준인 TWA는 근로자의 흡입노출에 대한 기준으로 LD₅₀보다는 LC₅₀와 더 연관성이 있다고 믿어지는데 본 자료에서는 그렇지 않고 상관성도 높지 않았다. 따라서 작업자가 작업장에서

사용하는 물질의 냄새 여부만을 갖고 작업장이 좋은지 안 좋은지 판단하는 것은 주의를 하여야 한다. 물론 냄새가 나는 것보다 나지 않는 사업장을 구현하는 것은 바람직하나 본 결과에서 보듯이 냄새가 나지 않는다고 해서 안전한 사업장이 아님을 주의하여야 한다

실제로 TWA는 근로자가 하루 8시간, 일주일 40시간 작업할 때 건강상 악영향이 나타나지 않는다고 믿어지는 농도로 흡입노출에 대한 기준이기는 하지만 이 기준을 제정할 때 실제로 동물실험 결과인 LD₅₀나 LC₅₀ 값을 많이 사용하지는 못했다.

우리나라 노출기준의 모태가 되는 미국정부산업위생전문가협회(ACGIH)가 노출기준을 제정

할 때 (1968년기준) 참고한 주요 자료를 보면 산업장 역학조사 자료 38%, 자발적 인체 실험 자료 11%, 동물실험 흡입자료 22%, 동물실험 경구실험자료 5%, 화학구조의 유사성 24%로 조사되었다[4]. 이 자료는 1968년 ACGIH의 직업노출기준인 TLV(threshold limit value)의 414종의 배경설정자료를 조사한 것인데 전체 노출기준 414종 (1968년 당시 기준)의 27%만이 동물 실험자료를 이용했고 이중 경구독성자료가 더 많이 이용되었다. 아마 흡입독성보다는 경구독성이 쉽기 때문에 자료가 더 많이 이용되었다고 추정되나 실제 동물 실험자료가 많이 이용되지 못해 상관성이 둘 다 높지 않은 것으로 파악된다. 최근에는 동물실험자료가 더 많이 이용되었을 가능성이 있지만 이에 대한 최근의 연구결과는 없다.

본 연구에서는 냄새역치가 있는 100여종에 대한 상관성을 본 것이지만 우리나라 노출기준이 설정된 물질 전체 656개 물질 중 LD₅₀와 LC₅₀의 상관성은 각각 0.36, 0.47로, 노출기준과 흡입독성치의 상관성이 더 크게 나타났다 [5].

화학물질의 냄새를 내게 하는 성분이 어떤 원소 또는 반응기에 대해 구체적인 설명은 어렵다[6]. 기존 문헌에서 구조와 반응기에 대한 분석의 시도가 이루어졌지만 대개 같은 계열의 화학물질에 대해 이루어졌고, 같은 계열의 화학물질에 대해서 어느 정도의 규칙성이 있음을 제시하였다[7-8]. 그러나 다양한 화학물질에 대해서는 연구가 잘 이루어지지 않았다. 본 연구에서는 냄새역치가 0.1 ppm이하인 물질 25개 모두의 구조식과 화학식을 그림 5에 냄새역치와 같이 표시하였다.

그림에서 보듯이 단순한 형태에서 복잡한 형태의 화학물질이 0.1 ppm의 냄새역치를 갖고 있다. 그림의 맨 윗 행에서 보듯이 단순한 구조는 황화수소, 이산화황, 오존, 메탄치올, 에탄치올과 같은 단순한 구조이다. 이런 결합구조가 냄새 발현에 영향을 주는지 아니면 특정성분이 냄새에 영향을 주는지는 불분명하다. 그러나 첫 행에서 보듯이 오존을 제외하면 황(S), 또는 황 성분이 들어간 치올(-SH)기, 냄새를 내는데 일정역할을 하는 것 같다.

두 번째 행에서는 암모니아와 같은 구조형태를 띤 것이 요오드포름, 포스핀 같은 것이 있고, 아민기를 가진 트리메틸아민이나 디메틸아민기

가 있다. 여기에서는 인, 요드, 그리고 질소성분을 가진 것들이 영향을 주는지 그 구조에 의한 것인지 불분명하다. 그 이후의 구조식에서도 보면 다양한 형태의 화학물질이 저농도의 냄새역치를 갖게 하는데 염소가 있는 화학물질(아세틸렌디클로라이드), 아세트산기가 있는 화학물질(n-아밀아세테이트, sec-아밀아세테이트), NCO가 있는 화학물질(톨루엔 2-4, 디이소시아네이트, 톨루엔 2,6 디이소시아네이트), 벤젠이나 페닐기가 있는 화학물질 등 다양하다. 그러나 이런 구조식을 갖고 있는 것이 모두 낮은 냄새역치를 갖고 있는 것은 아니어서 일률적으로 설명하기는 어렵다. 즉, 페닐기를 갖거나 벤젠기를 갖고 있는 물질 중 어떤 것들은 냄새 역치가 높을 수 있기 때문이다. 페놀 화학물질에서는 페놀링의 알킬 대체물질(alkyl substituent)이 메타위치에 있을 때 냄새역치가 매우 낮아지며, 페놀의 히드록실 그룹(OH)이 중요한 냄새 발현에 중요역할을 한다는 보고를 하기도 하였다[6].

또한 냄새물질이 여러 개 공존할 때는 이들이 독립적으로 작용하거나 상가작용, 상승작용, 또는 길항작용을 할 수 있음이 보고되었다 [9]. 냄새의 지각은 후각신경에서 일어나는데 이는 물질의 구조뿐만 아니라 생리학적 구조가 중요하고 이들을 연결하여 분석하려는 노력도 이루어졌다[10].

냄새의 지각은 후각신경에서 이루어지는데 냄새성분의 인지에는 냄새의 검출능력인 냄새역치, 냄새 강도, 냄새 특성, 냄새에 대한 기호도를 고려해야 하는데 다분히 주관적요소를 포함하고 있다[2]. 이를 요약하면 다음과 같다.

냄새역치는 보통 일정집단(테스트 집단)에서 적어도 일정한 퍼센트(예, 50%)의 사람이 감지해낼 수 있는 최소한의 농도를 말하며, 감지한 사람들의 감지농도 평균값을 취한다. 따라서 냄새역치는 정확히 생리학적인 상수 값이 아니며, 각 개인 간 반응 값의 통계적인 추정치이다. 냄새역치에는 두 가지 종류가 있다. 첫째는 검출 역치로 테스트 집단의 일정 퍼센트 사람에게서 후각신경에 감각반응을 일으키는 최저한의 농도로 해당 냄새가 없는 공 시료와 감지되는 냄새의 농도. 어떤 성분의 냄새가 있는지 없는지를 판별하는 기준이다. 둘째로는 인식 역치로 기술될 수 있는데 테스트 집단의 일정 퍼센트 사람이 해당 성분이 갖고 있는 특징적인 냄새를 감지해내는 최저 농도이다. 이는 검출역치와 달

리 해당 성분의 특징적인 냄새를 감지해야 한다. 보통 검출역치의 3~5배 수준이다.

냄새 강도는 느끼는 냄새에 대한 인지되는 강도를 의미하며 냄새성분의 농도에 비례한다. 이는 다음 식으로 표현할 수 있는데 n 값과 K 값은 물질마다 다르다.

$$S = KI^n$$

S: 냄새성분을 느끼는 인지 강도

I: 자극의 물리적 강도(냄새 농도)

n: 심리물리학적(psychophysical) 함수의 기울기

냄새 특성은 각 물질마다 갖고 있는 고유한 냄새의 특성으로 ASTM에서는 냄새의 특성을 ‘생선냄새’, ‘건초냄새’, ‘신냄새’, ‘산패한(지방산이 썩은 냄새) ‘암모니아 냄새’ 등 146개로 기술하기도 하였다. 냄새를 지각할 때 또한 감각 수용성의 차이로 인해 농도에 따라 냄새특성이 달라지기도 한다. 예를 들어 부틸초산($\text{CH}_3\text{-CO-O-(CH}_2\text{)}_3\text{-CH}_3$)인 경우 저농도에서는 달짝지근한 냄새가 나지만 고농도에서는 바나나 혹은 사과냄새가 난다. 카보닐설파이드(O=C=S)는 황으로 인해 저농도에서 화약 냄새가 나지만 고농도에서는 썩은 달걀 냄새가 난다. 냄새에 대한 기호도는 개인에 따라 어떤 냄새에 따라 유쾌 또는 불쾌하게 느끼는 것으로, 개인의 경험, 냄새발생 빈도, 냄새 특성, 냄새 강도, 지속기간에 따라 달라진다[2]. 또한 냄새의 지각에는 개인특성에 의한 변이가 심하고, 반복적 노출은 후각신경을 피로하게 하여 냄새를 인지하지 못하게 한다[2].

이해의 충돌

본 연구는 이해의 충돌이 없음.

감사의 글

본 연구는 서울대학교 보건연구재단(CMB) 및 BK21 Plus의 지원을 받아 수행되었음.

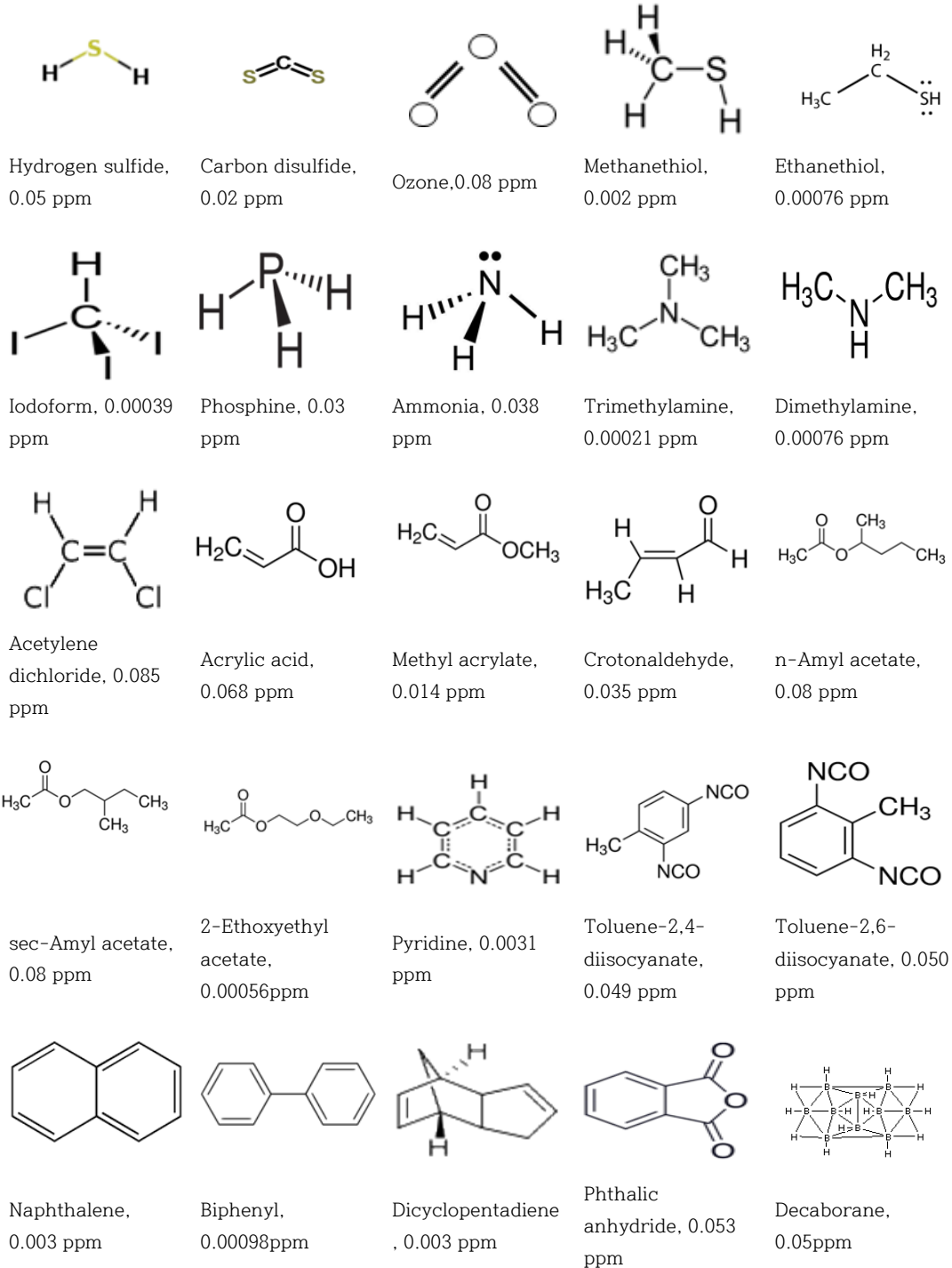


Figure 5. Chemical structures and odor thresholds of chemicals having less than 0.1ppm odor threshold.

References

1. 김선주, 윤충식, 함승현, 박지훈, 김송하, 김유나, 이지은, 이상아. 화학물질 관리연구 2. 환경부와 고용노동부의 관리화학물질의 구분, 노출기준 및 독성 지표 등의 특성비교. 한국산업보건학회지. 2015;25(1):58-71.
2. AIHA (American Industrial Hygiene Association), Odor thresholds for chemicals with established occupational health standards, AIHA, Fairfax, Virginia, 1997;1-80. ISBN 0-932627-34-X.
3. 윤충식, 화학물질의 물리 화학적 특성과 건강 유해성, 산업보건협회지. 대한산업보건협회. 2016;6:26-34.
4. 2장, 산업보건허용기준, 산업위생학 개론. 신광출판사. 서울. 2007;pp45-49.
5. 박지훈, 함승현, 김선주, 이권섭, 하권철, 박동욱, 윤충식, 화학물질관리연구-1. 산업안전보건법상 관리화학물질의 특성과 노출기준 비교. 한국산업보건학회지. 2015;25(1):45-57.
6. Czerny M, Bruekner R, Kirchhoff E, Schmitt R, Buettner A. The influence of molecular structure on odor qualities and odor detection threshold of volatile alkylated phenols. Chemical Senses, 2011; 36:539-553.
7. Laing DG, Legha PK, Jinks AL, Hutchinson I. Relationship between molecular structure, concentration and odor qualities of oxygenated aliphatic molecules. Chemical Senses, 2003, 28:57-69.
8. Lorber K, Schieberle P, Buettner A, Influence of the chemical structure on odor qualities and odor thresholds in homologous series of Alka-1,5-dien-3-ones, Alk-1-en-3-ones, Alka-1,5-dien-3-ols, and Alk-1-en-3-ols, Journal Agriculture and Food Chemistry. 2014; 62:1025-1031.
9. Ruth J. Odor thresholds and irritation levels of several chemical substances“ A review. American Industrial Hygiene Association Journal. 1986;47:A142-A151.
10. Chastrette M. Trends in structure-odor relationship, SAR and QSAR. Environmental Research. 1997;6:215-254.