

마스크에서 방출되는 휘발성유기화합물의 실시간 분석 사례

서혜경*

신한대학교 보건대학

Real-time Analysis and Safety Assessment of Volatile Organic Compounds Emitted from Masks

Hyekyung Seo*

The College of Biotechnology and Health, Shinhan University

ABSTRACT

Objectives: The safety of distributed masks has been widely investigated following the coronavirus disease (COVID-19) pandemic. Although the unpleasant odor from masks is concerning, research on the toxicity of volatile organic compounds emitted from them is limited. Here, we aimed to quantify the VOCs emitted from masks and explore strategies for safe mask usage.

Methods: The VOCs emitted from 15 masks in five categories were measured. Proton transfer reaction time-of-flight mass spectrometry (PTR-TOF-MS, IONICON, Austria), which can rapidly and sensitively detect complex mixtures, was conducted. The test chamber connected to the equipment was comprised of uninterrupted acrylic and glass. PTR-TOF-MS data were analyzed using Tofware (PTR-MS Viewer 3.3, IONICON, Austria). Statistical analyses were performed using SPSS ver. 20 to determine the highest, lowest, and average concentrations of the VOCs (IBM SPSS Inc., USA). Analysis of variance (ANOVA) was conducted to compare the VOCs emitted from different masks.

Results: A total of 25 VOCs were detected among the 15 masks. The peak concentrations of formaldehyde, acrolein, isoprene, and benzene were higher than the exposure standards (Ceiling). The average concentrations of these compounds differed significantly among the mask samples ($p < 0.05$). The VOC concentration decreased gradually after approximately one hour.

Conclusions: Higher concentrations of VOCs were emitted from healthy, printed, and surgical masks compared to industrial masks. Further research is required to determine the factors affecting VOCs, such as mask material, temperature, and humidity. For safety, masks must be ventilated for at least an hour before usage.

Key words: toxicity, VOCs, PTR-TOF-MS, Ceiling, ventilate

I. 서 론


휘발성유기화합물(volatile organic compounds, VOCs)은 대기 중으로 휘발되어 악취를 유발하고, 광화학반응에 의한 광화학스모그를 유발시키기도 한다. 벤

젠(benzen)과 같은 물질은 발암성 물질로서 인체에 매우 유해하며 스티렌(styrene)을 포함한 대부분의 휘발성유기화합물은 악취를 일으킨다.

이러한 물질의 유해성은 졸음, 현기증, 무기력증, 구토 등 증상이외 호흡곤란, 발암 및 백혈병 등 다양하며

*Corresponding author: Hyekyung Seo, Tel: 010-3955-5229 E-mail: seohk65@hanmail.net
The College of Biotechnology and Health, Shinhan University, 95 Hoam-ro, Uijeongbu-city, Gyeonggi-do11644, Republic of Korea

Received: August 23, 2024, Revised: September 10, 2024, Accepted: September 26, 2024

 Hyekyung Seo <https://orcid.org/0000-0002-5615-8523>

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.

피부접촉이나 호흡기 흡입을 통해 신경계 장애 등을 일으킬 수 있다. 에틸벤젠(ethylbenzene) 등 물질은 단기 노출 시 현기증, 무기력증 등을 나타내지만 장기간 노출될 경우 암 유발 가능성(International Agency for Research on Cancer, IARC2B)이 있다. 톨루엔 등은 단기 노출시 구토 등 신경계통 이상을 유발하며 장기간 노출될 경우 간, 신장 독성을 유발할 수 있으므로 주의 깊게 관리하여야 한다. 따라서 환경부(실내공기질 관리법, 2023)는 노출기준을 정하여 관리하고 있으며 세계보건기구(WHO, 2010)는 실내공기질(indoor air quality, IQA) 가이드라인을 통해 주요 휘발성유기화합물의 노출 경로, 건강 영향, 건강 위해도 평가, 실내외 농도의 관계, 관리 농도 등 모니터링할 수 있는 자료를 제시하여 지속적으로 관리하고 있다.

최근 미세먼지 농도 증가 및 바이러스 등 호흡기계를 통한 유해인자 확산을 예방하기 위해 작업장 및 일반 환경에서 마스크를 사용하는 예가 증가하였다. 그러나 일부 연구(Li et al., 2022; Ha et al., 2023)는 다양한 종류 마스크에서 휘발성 유기화합물이 유발될 수 있다고 보고하여 건강 위험을 초래하지 않도록 안전한 사용을 경고한 바 있다. Chang 등(2022)은 초기 1시간 동안 고농도 휘발성 유기화합물이 집중 측정되었다고 보고하였다. 이는 WHO가 정한 IAQ 4단계를 초과하는 정도이므로 사용자 안전에 우려가 되는 상황이며 이에 따른 보건학적 문제를 인식할 필요가 있다. COVID-19 팬데믹 이후 유통 마스크의 안전성에 대한 연구가 지속적으로 이루어지고 있지만 불쾌한 냄새가 있다는 여론에도 불구하고 그와 관련한 휘발성유기화합물 독성 등에 대한 연구는 아직 미비한 실정이다.

본 조사에서는 전염성이 높은 생물학적 유해 인자가 비말과 에어로졸 형태로 전파되지 않도록 착용하는 마스크와 분진 등 유해 입자 노출을 방지하기 위해 사용하는 마스크의 안전성을 평가하기로 하였다. 공기 중 가스상 물질을 분석하는 고성능 액체크로마토그래프(high performance liquid chromatograph, HPLC), 가스 크로마토그래프 질량분석기(gas chromatograph Mass Spectrometer, GC-MS) 등은 물질의 농도가 낮은 경우 불검출될 수 있다. 따라서 최근 화학적 이온화 방식(chemical ionization, CI)의 분석기술인 초고감도 양성자 이동 반응 인터페이스 실시간 비행시간차 질량분석기(proton transfer reaction time of flight, PTR-TOF-MS, IONICON, Austria)를 이용하여 시험

마스크에서 방출되는 휘발성유기화합물 노출을 탐색하고 이것으로부터 안전한 사용을 모색하고자 한다. 즉 근로자를 위한 산업용 마스크, 의료인용, 일반 국민이 사용하는 보건용 마스크와 다채로운 만화 패턴이 있는 어린이용 마스크 등으로부터 유래하는 휘발성 유기화합물 방출 가능성을 평가하고 마스크 간 차이를 비교하고자 한다. 이 조사를 통해 안전한 마스크 사용을 유도하며 특히 어린이 등 취약계층이 사용하는 마스크의 안전성에 대한 이해를 돕고자 한다.

II. 조사방법

1. 시험 마스크

시중에 유통되는 보건용, 산업용, 공산품, 어린이용, 수술용 마스크 제품 중 각 3종을 무작위 선정하였다(Figure 1). 사용 용도가 다른 5가지 분류 제품 15개 시험 마스크에서 방출되는 휘발성유기화합물을 측정한다. KF 등급인 보건용 마스크와 KCs 인증된 산업용 마스크를 제외하고 공산품, 어린이용 및 수술용 마스크는 별도 인증이 없는 제품이었다. 대부분 모두 개별 포장된 제품이지만 그중 산업용 및 수술용 마스크는 더미 포장된 상태였다.

2. 휘발성유기화합물 측정 방법

1) 측정용 장비 및 챔버

시험 마스크에서 유래되는 휘발성유기화합물 측정은 PTR-TOF-MS를 이용한다. 일반적으로 GC-MS를 이용하여 정성 및 정량할 수 있으나 GC-MS를 사용하면 시료 채취 및 전처리 분석 등 시간이 최소 1시간 이상 소요되므로 마스크에서 순간적으로 방출되는 휘발성 유기화합물 분석에는 제한점을 가지고 있다. PTR-TOF-MS를 이용할 경우 시료채취 및 전처리 과정 없으며 시료를 파괴하지 않은 상태에서 분석한다. 이 장비의 이온화원에서 발생된 하이드로늄(H_3O^+)은 H_2O 분자보다 낮은 양자친화력(proton affinity, PA)을 가지고 있는 시료공기 중 O_2 , N_2 , CO_2 등 성분과는 잘 반응하지 않으며, 휘발성유기화합물과 빠르고 민감하게 반응하여 복잡한 혼합물을 분리할 수 있는 장점이 있다. 측정 장비와 연결된 시험용 챔버는 무정전 아크릴과 유리 재질(C&I Tech, Korea)로 제작하여(Chang et al., 2022) 마스크에서 방출되는 휘발성 유기화합물이 수집되도록 하였다(Figure 2).



Figure 1. Classification of test masks

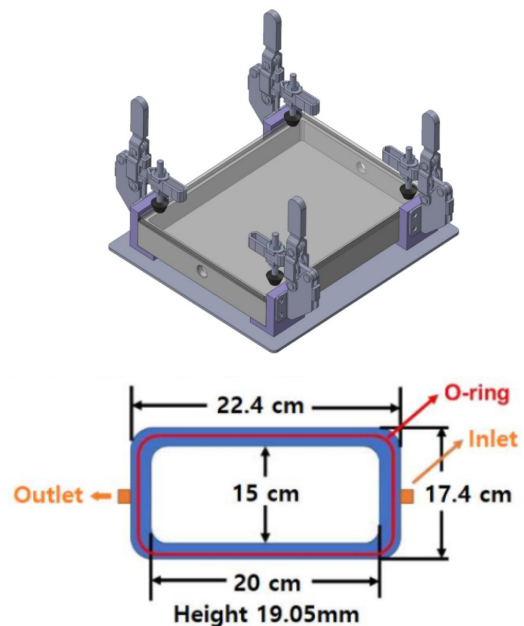
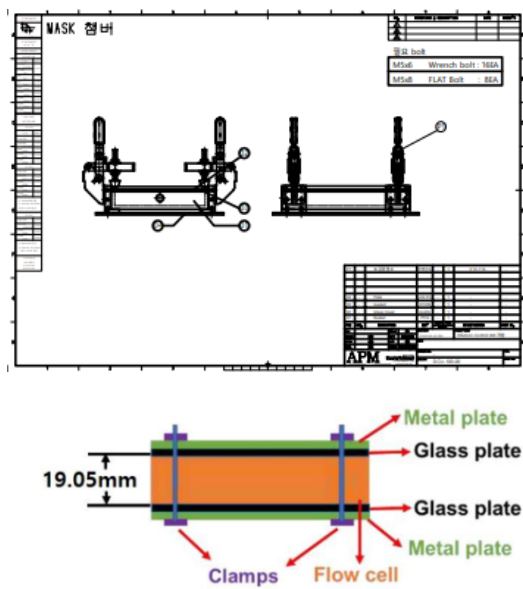


Figure 2. Schematic of test chamber

2) 측정 모식도에 따른 측정 방법

PTR-TOF-MS는 표준시약이나 표준가스가 없는 물질에 대해서도 절대 정량이 가능하다. 고순도 질소가스(N_2 , 99.99%)를 일정 유량(Mass flowmeter 5300,

TSI, USA) 넣어주어(100ml/m) 마스크에서 방출될 가능성이 있는 휘발성 유기화합물을 분석한다. PTR-TOF-MS는 하이드로늄을 생성하는 이온화원(ion source)과 양자전이반응(proton transfer reaction)이 일어나는

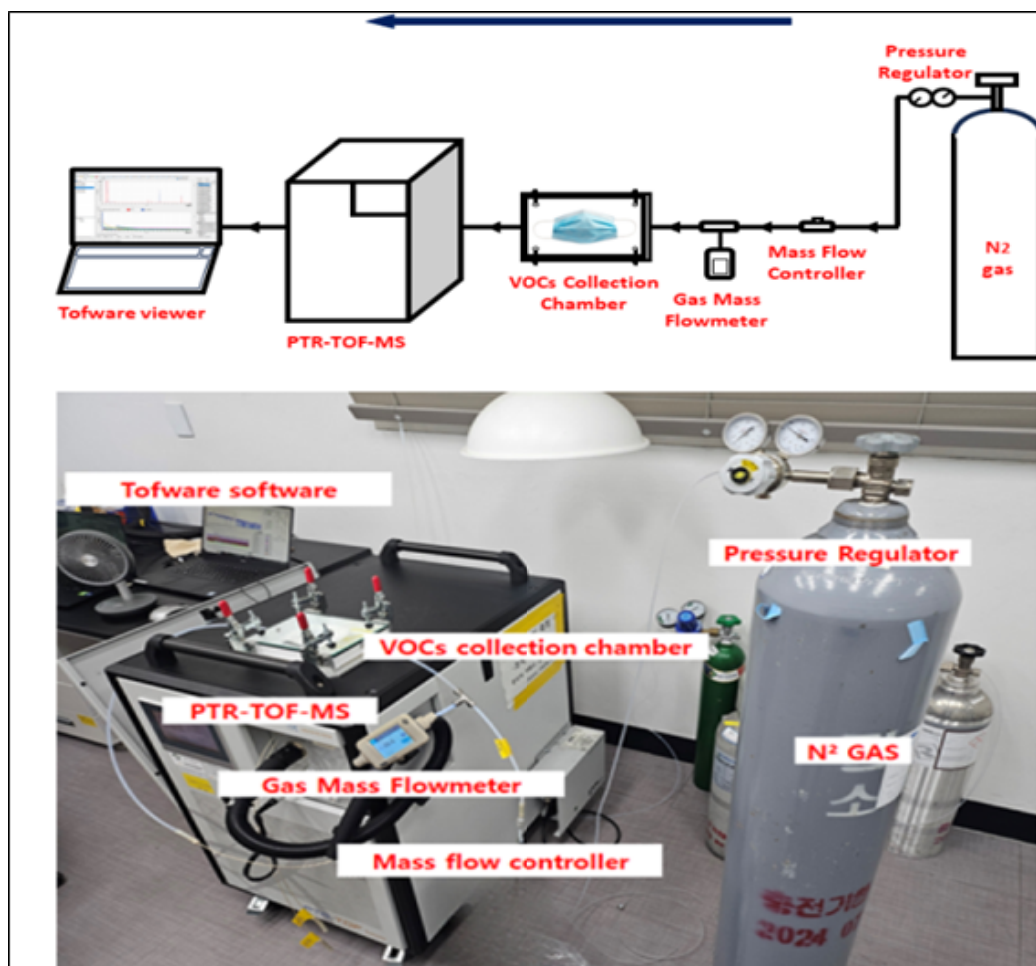


Figure 3. Diagram of Flow system

이동도관(drift tube) 및 비행시간차(time of flight) 챔버로 구성되어 있다. 측정된 데이터는 전용 소프트웨어인 Tofware (PTR-MS Viewer 3.3, IONICON, Austria)로 분석한다(Figure 3). 포장지를 벗긴 직후 바로 챔버 샘플라인에 마스크를 장착한다. 측정 전 챔버내 배경 농도를 15분간 측정하여 blank를 확인한 뒤 45분간 시험 마스크 농도를 측정하였다. 다음 마스크 측정 시에도 같은 방법을 반복한다. 하나의 시험 마스크 제품에 대하여 3회씩 반복 측정하고 평균을 산출하였다.

3) 통계분석

자료 분석은 SPSS system ver. 20(IBM spss Inc. USA)를 이용한다. 측정된 물질의 평균 농도 및 최고값, 최저값을 분석하며 마스크로부터 유래된 휘발성 유기화합물은 분산분석(ANOVA) 으로 평균 차이를 비교하였다.

III. 조사결과

1. 시험 마스크 특성

보건용, 산업용, 일반 공산품, 어린이 마스크 및 수술용 마스크로 유통되는 것을 각 3종씩 구분하여 총 15개 제품을 사용하였다. 제품 유형은 2단 및 3단 접이식 마스크 외 컵형 마스크가 있으며 배기 밸브가 있거나 그렇지 않은 것이었다. 또한 마스크 재질로는 면 및 부직포 마스크 등 표 1과 같은 특징을 나타낸다(Table 1).

2. 측정된 휘발성 유기화합물의 종류

15종 시험 마스크에서 측정된 물질은 Table 2와 같다. 25종 휘발성유기화합물에 대한 최고치중 미국 산업위생전문가협회(American Conference of Governmental Industrial Hygienists, ACGIH), 미국

Table 1. General characteristics

Classification (N=15)		Type
KF mask	A-1	Three folding type, valved
	A-2	Three folding type, valved
	A-3	Folding type, not valved
KCs mask	B-1	Folding type, carbon layer with valved
	B-2	Cup type, not valved
	B-3	Cup type, valved
General mask	C-1	Folding type, patterned fabric
	C-2	Folding type, non-woven fabric
	C-3	Flat, cotton mask
Children mask	D-1	Folding type, patterned
	D-2	Folding type, patterned
	D-3	Folding type, patterned
Surgical mask	F-1	Flat, non-woven fabric
	F-2	Flat, non-woven fabric
	F-3	Flat, non-woven fabric

*Total number of masks (N)

Table 2. Concentration of Substances measured by PTR-TOF-MS (ppm)

Substance	CAS No.	Formula	Peak concentration	Ceiling	Mask ID
Formaldehyde	50-00-0	CH ₂ O	0.30	0.3*	B-1, C-1
Methanol	67-56-1	CH ₄ O	12.98	-	C-1
Propyne	74-99-7	C ₃ H ₄	35.47	-	A-2
Acetonitrile	75-05-8	C ₂ H ₃ N	0.38	-	A-2, F-3
Cyclopropane	75-19-4	C ₃ H ₆	12.35	-	B-2
Acetaldehyde	75-07-0	C ₂ H ₄ O	28.95	25**	A-2
Acrolein	107-02-8	C ₃ H ₄ O	2.55	0.1*	All
Acetone	67-64-1	C ₃ H ₆ O	33.46	-	F-3
Isoprene	78-79-5	C ₅ H ₈	2.52	5***	A-2
Ethyl vinyl ether	109-92-2	C ₄ H ₈ O	50.44	-	A-2
Benzene	71-43-2	C ₆ H ₆	5.77	25**	A-3, D-1, F-2
2-Pentanone	107-87-9	C ₅ H ₁₀ O	13.68	-	A-2
Amylamine	110-58-7	C ₅ H ₁₃ N	3.30	-	A-3
Lactic acid	50-21-5	C ₃ H ₆ O ₃	2.51	-	A-3, D-3
Toluene	108-88-3	C ₇ H ₈	12.98	300**	A-3
Norbornene	498-66-8	C ₇ H ₁₀	0.66	-	A-2, F-2
2-Hydroxypyrazine	6270-63-9	C ₄ H ₄ N ₂ O	0.06	-	A-3, D-1
Glutaral	111-30-8	C ₅ H ₈ O ₂	2.03	-	A-2
m-Xylene	108-38-3	C ₈ H ₁₀	19.69	-	A-3
Heptanal	111-71-7	C ₇ H ₁₄ O	0.71	-	A-2, F-2
Heptylamine	111-68-2	C ₇ H ₁₇ N	0.11	-	A-2, F-2
Benzimidazole	51-17-2	C ₇ H ₆ N ₂	0.14	-	A-2, D-1
Mesitylene	108-67-8	C ₉ H ₁₂	1.31	-	A-2
Dicyclopentadiene	77-73-6	C ₁₀ H ₁₂	0.56	-	A-2
α-Pinen	80-56-8	C ₁₀ H ₁₆	0.57	-	A-2, D-1

*ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists)

** OSHA (Occupational Safety and Health Administration) *** MOEL (Ministry of Employment and Labor)

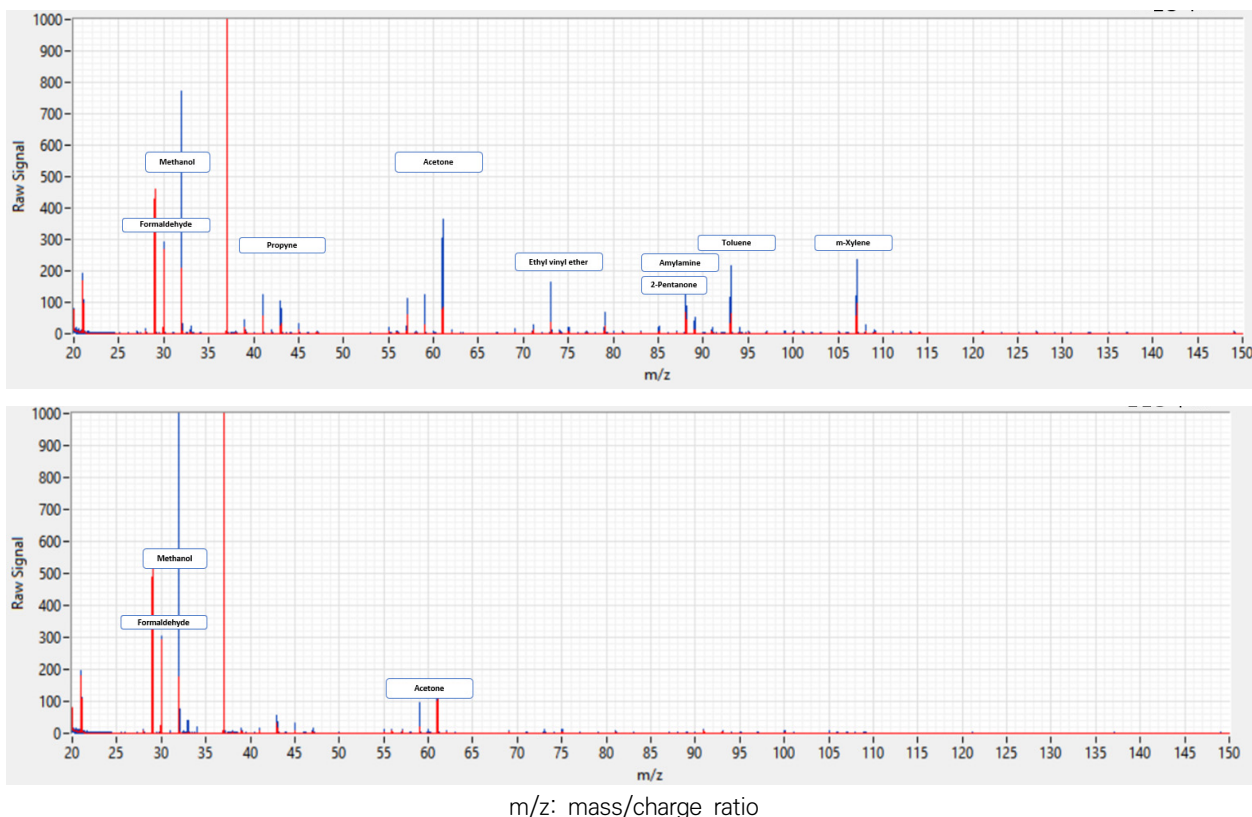


Figure 4. Emitted substances from KF(top) and KCs(bottom) masks

산업안전보건청(Occupational Safety and Health Administration, OSHA) 그리고 고용노동부(Ministry of Employment and Labor, MOEL) 고시 제2020-48호에 의한 천정값(ceiling)을 초과한 물질이 있었다(Table 2). 주로 보건용 마스크와 수술용 마스크에서 초과되는 물질 종류가 많았던 반면 산업용 마스크는 다른 마스크에 비해 방출되는 물질 종류가 적었다(Figure 4).

3. 초과된 peak 물질에 대한 마스크 간 평균 비교

보건용, 산업용, 공산품, 어린이용 및 수술용 마스크에서 방출된 휘발성 유기화합물 중 노출기준을 초과한 3가지 물질에 대해 평균 농도를 비교하였다(Table 3). 이 물질들은 마스크 종류 간 유의한 차이를 보였다($p < 0.05$). 포름알데히드(formaldehyde)는 일부 마스크에서 천정값에 근접한 것이 있었지만 평균값은 초과하지 않았다. 아세트알데히드(acetaldehyde)는 일부 보건용 마스크에서 높은 수준으로 초과하였으나 평균값은 그렇지 않았다. 하지만 아크롤레인은 모든 마스크에

서 최저, 최고 및 평균값이 기준을 초과하였다(Table 3). 그림 6과 같이 포름알데히드는 공산품마스크에서 높은 방출이 있었으며 아세트알데히드는 보건용 마스크에서 매우 높았다. 또한 아크롤레인은 모든 마스크가 기준을 초과하였으나 그중 산업용 마스크가 가장 낮았다(Figure 5).

4. 실시간 측정에 대한 농도 변화

휘발성 유기화합물 측정에 대한 실시간 변화 양상은 다음과 같다. 측정 챔버 내로 유량이 유입되어 마스크로부터 방출된 휘발성유기화합물은 실시간 비행시간차 질량분석기에서 측정되기 전 300초 정도 퍼지(purge)를 거친 이후 급격한 방출량 증가를 확인할 수 있었다(Figure 6).

모든 마스크에서 기준치를 초과한 아크롤레인은 마스크 종류에 따라 실시간 농도는 달랐지만 측정 이후 50분 이내 급격한 감소가 없으며 서서히 낮아진 양상을 보였다(Figure 6). 이외 벤젠 등 기타 물질도 유사한 양상으로 완만한 기울기를 보이며 물질의 방출은 감소하였다.

Table 3. Comparison of masks for excess VOCs (ppm)

Mask	Min	Max	GM(GSD)	<i>p</i>	VOCs
A	0.16	0.23	0.18(1.17)	0.01	Formaldehyde
B	0.14	0.28	0.18(1.25)		
C	0.15	0.29	0.21(1.21)		
D	0.14	0.18	0.16(1.08)		
F	0.12	0.18	0.14(1.18)		
A	2.72	28.95	7.29(2.56)	0.04	Acetaldehyde
B	2.02	3.99	2.89(1.28)		
C	2.15	7.76	3.51(1.42)		
D	3.32	4.65	4.05(1.13)		
F	1.71	4.32	2.76(1.40)		
A	0.45	2.49	1.31(2.02)	0.00	Acrolein
B	0.17	0.46	0.28(1.38)		
C	0.24	2.35	0.60(2.31)		
D	0.99	2.55	1.55(1.46)		
F	0.18	1.40	0.62(2.06)		

N= 3 masks x 3 times x 5 types = 45

p : significance calculated using ANOVA(*p*(0.05))

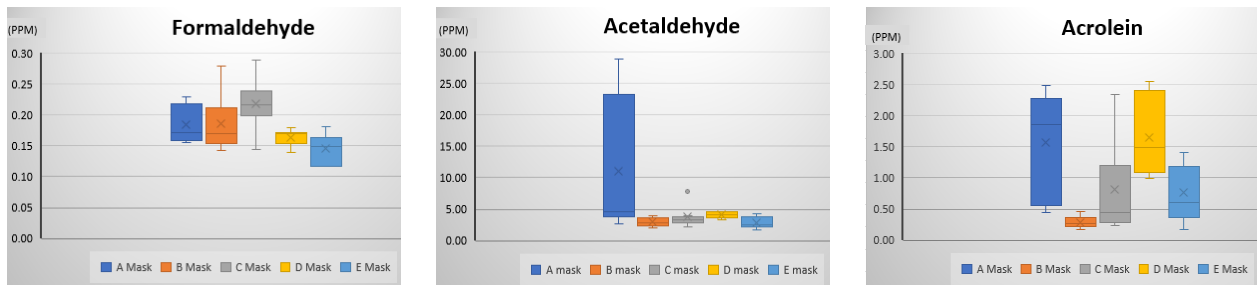


Figure 5. Comparison of emissions from the 5 types of masks

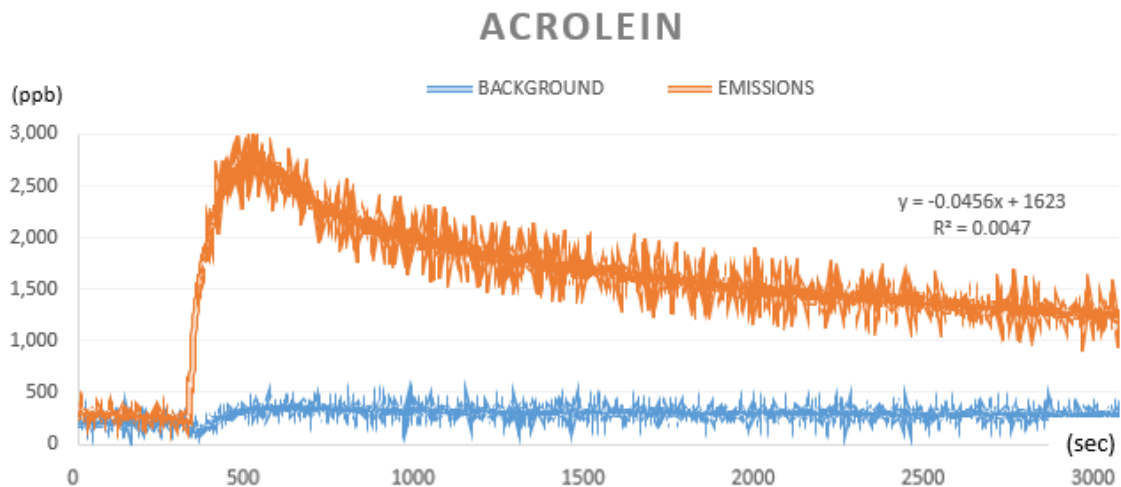


Figure 6. Real time concentration for VOCs measured

IV. 고 찰

마스크로 얼굴을 가리고 공기 중 전염성이 있는 생물학적 유해인자 또는 분진 등 작업환경의 유해 노출로부터 건강을 보호하고자 할 때 다양한 방법으로 안전성을 확인할 필요가 있다. 이 조사는 마스크에서 유래하는 휘발성 유기화합물이 있는지 확인하기 위하여 분석감도와 질량 분해능이 좋은 PTR-TOF-MS를 이용하였다. 이 장비는 하이드로늄(H_3O^+)을 사용하는 이온화원(ion source)과 이온과 휘발성 유기화합물 사이에서 양자전이 반응을 하는 이동도관(drift tube)을 통해 화학적 이온화 방법인 양자전이 반응을 유도한다. 이는 매우 빠르고 민감하게 조각화할 수 있는 장점을 지니고 있으므로 마스크에서 방출될 가능성이 있는 휘발성 유기화합물을 확인하기에 적당하다.

따라서 본 조사는 이 장비를 이용하여 5종 마스크 15개 제품에 대해 챔버 내 실험을 하였다. 간섭을 최소화 하기 위하여 무정전 아크릴과 유리 재질로 챔버를 제작하였으며 Chang 등(2022) 선행 연구를 참고하였다. 이들은 어린이용, 수술용, N95, 카본 마스크로 부터 15종의 휘발성 유기화합물이 방출되는 것을 확인하였으며 메탄올(methanol), 아세토니트릴(acetonitrile), 아세트알데히드, 아크롤레인, 이소프렌, 톨루엔 등이 방출된다고 하였다. 본 조사에서 확인된 것과 유사한 물질로서 그중 일부는 독성과 관련된 것들이었다. 주요 휘발성 유기화합물은 마스크 생산과 관련된 화학물질 및 공정에서 비롯된 것으로 수술용 마스크 경우 처음 1시간 이내 고농도로 방출된 후 자연스럽게 허용 가능 수준으로 떨어지는 것이 확인되었다(Chang et al., 2022). 특히 다채로운 만화 그림이 있는 어린이용 마스크는 방출량이 많았으며 가장 낮은 배출량을 보인 N95 마스크는 활성탄 층 영향으로 인한 독성 메탄올이 제거되기까지 6시간 소요된다고 하였다. 본 조사는 1시간 이내 측정이 이루어졌으므로 방출되는 물질의 종류와 감소되는 경향성을 확인할 수는 있었지만 휘발성 유기화합물이 무해한 정도로 낮아진 시점을 확인하기 어려웠다. 하지만 Figure 6과 같이 측정 초기에 급격히 방출된 휘발성유기화합물은 시간이 경과함에 따라 서서히 낮아지는 경향을 볼 수 있었으며 이는 선행 문헌 결과(Ha et al., 2023; Chang et al., 2022; Oh et al., 2022; Even et al., 2020)와 상통하였다.

마스크 유래 휘발성 유기화합물에 대한 연구(Liu et al., 2022)에 의하면 의료용 마스크 60종으로 부터 69

개 물질이 방출된다고 하였으며 주요 그룹은 알칸(alkane), 에스테르(ester), 벤젠 및 알코올(alcohol)이었다. 그 외 케톤(ketone), 에테르(ether), 페놀(phenol), 아미드(amide) 및 기타 물질과 에탄올(ethanol), 톨루엔 등 검출되었으므로 고위험 물질에 대한 노출 평가 및 인체 건강에 미치는 영향을 평가하여야 하며 제품의 안전 증진을 위한 과학적 데이터가 필요하다고 하였다. 또한 팬데믹 이후 우리가 건강을 지키기 위해 사용하는 마스크와 소독 제품들로 인하여 휘발성 유기화합물이 방출(Bruchard et al., 2023)되고 있으므로 전례없는 환경오염과 화학물질의 독성으로 인한 부정적 건강 영향 피해를 우려하였다(Li et al., 2022).

본 조사에서 분석된 주요 물질인 포름알데히드는 비인두암과 백혈병의 원인물질이며 최근 국제암연구소(International Agency for Research on Cancer, IARC)에서 실험동물의 발암성에 대한 충분한 근거와 발암에 대한 강력한 근거를 적용하여 그룹 2A로 지정한 아크롤레인 등이 있었다(IARC, 2021). 암의 성장을 억제하는 p53 유전자는 아크롤레인 등 노출로 인하여 DNA 손상이 유발되므로 돌연변이를 일으켜 폐암 등을 유발하며 이는 벤조피렌(benzopyrene)보다 더 큰 영향을 미친다고 알려져 있다. 또한 급성 폐손상, 만성폐쇄성폐질환(Chronic obstructive pulmonary disease, COPD), 천식 발병에 기여한다고 한다(Feng et al., 2006; Bein & Leikauf, 2011). 한편 안면마스크에서 휘발되는 물질에 대한 잠재적 건강 위험을 평가한 Huang 등(2023)은 헵타날(heptanal), 벤젠, 알데히드 등 방출된 양이 공기질 기준보다 낮았지만 평생 노출될 경우 발암 가능성을 초과할 것을 우려하여 마스크 품질에 주의를 기울이고 환기할 것을 권장하였다.

이러한 관점으로 고찰해 보면 포름알데히드 최고치는 0.3 ppm으로 측정되어 ACGIH 허용기준인 천정값을 초과한 농도였다. 특히 아크롤레인은 모든 마스크에서 기준치를 초과하였는데 일부 마스크에서 최고 25배 넘는 수준으로 방출된 사례가 있었다. 비록 이 결과들은 단시간 방출된 최고치에 해당하는 것이지만 안전한 마스크 사용을 위한 자연 환기 등 대안이 필요할 것으로 사료된다. 더욱이 방출된 휘발성유기화합물이 25종 정도로 많고 마스크 종류에 따라 다른 방출 정도를 확인하였으므로 재료 및 가공 등에 대한 방출 물질과의 관계성을 추가로 알아볼 필요가 있다. 하지만 이 조사가 작

업환경측정 및 공정시험법으로 평가한 것이 아니며 실시간 측정 장비 PTR-TOF-MS를 사용하였으므로 작업장 노출기준과 직접 비교할 수 없다는 한계를 지닌다.

이 장비를 사용한 다른 선행 연구에 의하면 조리 시 발생하는 포름알데히드, 아세트알데히드 등 방출은 요리 시작 초기에 급격히 상승하였고 이후 다소 안정(Oh et al., 2022)된다고 하였으며 컴퓨터 모니터, 텔레비전 등 LCD에서 측정된 30개 이상의 휘발성 물질은 습도에 따라 방출 정도가 다르다(Liu & Abbatt, 2021)고 하였다. 휘발성 유기화합물 방출은 습도 외 온도에도 영향을 받는다고 알려져 있으며 Ryu 와 Kim(2023)에 의하면 마스크에서 배출되는 휘발성 유기화합물 농도가 다양한 조건에 따라 상이하다고 보고하였다. 이들은 폴리우레탄 및 폴리프로필렌 재질의 일회용 비말차단 마스크, 수술용 마스크 그리고 면 마스크 등을 사전 노출 시킨 시간과 온도에 따라 방출된 농도 차이를 확인하였으므로 마스크 제품의 온도가 높아질수록 방출되는 물질이 많고 마스크 제품을 개봉 후 30분 방치한 경우 유해물질의 농도가 감소된다고 하였다. Kim(2022)은 마스크의 온도에 따라 발생하는 휘발성 유기화합물 농도 증가 수준이 122~343%에 달하므로 기온이 높은 여름 조건에서 마스크를 사용할 경우 주의하여야 한다는 안전한 사용지침을 제시하였다. 이러한 휘발성 유기화합물 방출 특성을 참고할 경우 본 조사는 온 습도를 측정하지 않은 제한점이 있다.

이 조사의 목적은 시험 마스크에서 방출되는 휘발성 유기화합물 노출을 탐색하고 마스크 간 차이를 비교하여 안전한 사용을 모색하고자 하는 것이다. 측정된 휘발성 유기화합물은 약 25종 이상으로 그중 고농도로 방출된 물질은 포름알데히드, 아세트알데히드 및 아크롤레인 등이며 이외 프로파인(propyne), 아세톤(acetone), 메탄올, 에틸에테르(ethyl vinyl ether), 자일렌(xylene) 등 산업안전보건기준에서 제시하는 관리대상 물질들이었다(2024). 특히 고농도로 방출된 물질들은 보건용, 산업용 등 시험 마스크 간 의미있는 차이를 보였는데 마스크 재질과 프린트된 원단 등 재료의 특성이 작용한 것으로 사료된다. 일부 연구(Kim et al., 2024)는 마스크 재질로 부터 피부 트러블이 유발된다고 하였으며 그 원인이 휘발성 유기화합물이라고 하였다. 또한 Liu 등(2022)은 마스크 재질과 휘발성 유기화합물 방출은 상당한 관련성이 있다고 하였으므로 본 조사에서 마스크 재질에 따라 차이를 보인 결과는 개연성

이 있다고 사료된다.

이러한 근거를 바탕으로 마스크 재질에 대한 성분조사와 휘발된 물질의 종류를 함께 분석한다면 보다 객관적인 자료가 될 것이다. 또한 제한점으로 파악된 휘발성 유기화합물 방출에 영향을 미칠 수 있는 온, 습도 등 환경적 조건과 마스크 재질 등을 추가로 고려한다면 보다 정확한 인과관계를 추론할 수 있다. 하지만 이 사례 결과에 의하면 방출된 유해 물질들은 시간 경과에 따라 서서히 감소하는 경향이 있었으며 안전한 마스크 사용을 위해 자연스럽게 환기함으로써 유해한 영향을 받지 않도록 노력하는 것이 좋을 것으로 판단되었다.

V. 결 론

시험 마스크로부터 방출되는 휘발성 유기화합물 분석 다음과 같이 요약될 수 있다.

1. 본 조사에서 확인한 마스크 유래 휘발성 유기화합물은 약 25종으로 확인되었다.
2. 측정된 물질은 대부분 유해하며 포름알데히드, 아세트알데히드, 아크롤레인 등 이다.
3. 일부 마스크에서는 천정값을 초과한 물질이 확인되었다.
4. 산업용 마스크 보다 보건용, 프린트 된 어린이용 및 수술용 마스크에서 방출된 휘발성 유기화합물의 종류가 더 많았다.
5. 개별 포장되지 않고 더미 포장된 산업용 마스크는 방출된 물질의 종류가 적었지만 수술용 마스크는 그렇지 않았다.
6. 휘발성 유기화합물 방출은 시간이 경과함에 따라 서서히 감소하였다.

결론적으로, 마스크에서 방출되는 휘발성 유기화합물은 착용자 건강에 유해한 것들이지만 시간 경과에 따라 자연스럽게 낮아지는 것을 확인하였다. 안전한 사용을 위해 최소 1시간 이상 자연 환기할 필요가 있다고 사료된다.

감사의 글

본 조사는 2023년 (주)에이퍼엠엔지니어링 응용개발과제로 선정된 연구이며 연구가 수행되도록 적극 지원해 주신 윤관훈 대표님께 감사드립니다. 실험을 도와준 오

병훈 과장님과 나상철 차장님 그리고 안하림(석사과정), 장호영(박사과정)에게 특별히 감사합니다.

References

- Bein K & Leikauf GD. Acrolein a pulmonary hazard. *Molecular Nutrition & Food Research* 2011;55: 1342–1360
- Bruchard W, Bajracharya A, Johnston NAC. Volatile organic compound emissions from disinfectant usage in the home and office. *Environ Health Perspec* 2023; 131(4):1–3 <http://doi.org/10.1289/EHP11916>
- Chang Y, Huang RJ, Cheng K, Lin C, Ling Q et al. Highly time-resolved and nontargeted characterization of volatile organic compound emissions from face masks. *Environ Sci Technol Lett* 2022 <http://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00524>
- Even M, Hutzler C, Wilke O, Luch A. Emissions of volatile organic compounds from polymer-based consumer products: Comparison of three emission chamber size. *Indoor Air* 2020;30:40–48 <http://doi.org/10.1111/ina.12605>
- Feng Z, Hu W, Hu Y, Tang M. Acrolein is a major cigarette-related lung cancer agent: Preferential binding at p53 mutational hotspots and inhibition of DNA repair. *Proceeding Nation Academ Sci* 2006;103: 15404–15409
- Ha Y, Koo Y, Kim D, Kim PG, Song E et al. The use of face masks to reduce inhalation exposure to reactive disinfectants *Atmospheric Environ* 2023. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.120023>
- Huang Q, Pan L, Luo G, Jiang R, Ouyang G et al. Exploring the release of hazardous volatile organic compounds from face masks and their potential health risk. *Environ Pollut* 2023;161:1–8 <http://doi.org/10.1016/j.envint.2023.122042>
- IARC Monographs Volume 128 Group. Carcinogenicity of acrolein, crotonaldehyde and acrolein, *Lancet Oncology* 2021;22:19–20
- KOSHA Guide H-132-2023, <https://www.kosha.or.kr/kosha/data/guidanceH.do>
- Kim M, Kim MK, Kim JH. Effects of maskne cosmetics to inflammation elicited by volatile organic compounds (VOC). *J Kor Soc Cosmetol* 2024;30(2):260–269 <https://doi.org/10.52660/J-KSC.2024.30.2.260>
- Kim YH. Development of monitoring techniques for inhalable hazardous volatile organic compounds (VOCs) released from mask products against COVID-19. Ministry of Science and ICT. 2022
- Liu Q & Abbatt J. Liquid crystal display screens as a source for indoor volatile organic compounds. *PNAS* 2021;118(23): 1–7. <https://doi.org/10.1073/pnas.2105067118>
- Liu Y, Wang Z, Wang W, Xing J, Zhang Q et al. Non-targeted analysis of unknown volatile chemicals in medical masks. *Environ Pollut* 2022;161:1–10 <http://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.107122>
- Li ASH, Sathishkumar P, Selahuddeen ML, Wan M et al. Adverse environmental effects of disposable face masks due to the excess usage. *Environ Pollut* 2022;308:1–7 <http://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119674>
- Ministry of Environment. Clean Air Conservation Act 1110. 2024. https://www.law.go.kr/DRF/lawService.do?OC=me_pr&target=law&MST=264371&type=HTML&mobileYn=&efYd=20240724
- Ministry of Environment. Indoor Air Quality Control Act 19663. 2023 https://elaw.klri.re.kr/kor_mobile/viewer.do?hseq=63632&type=sogan&key=16
- Occupational Safety and Health Act 417, 420. 2024 https://elaw.klri.re.kr/kor_service/law-ViewMultiContent.do?hseq=55395
- Oh B, Jeong JY, Shin J, Kim B. A field study on volatile organic compounds generated during cooking in a large pot using PTR ToF MS. *J Environ Anal Health & Tox* 2022;25(1):33–42 <http://doi.org/10.36278/jeaht.25.1.33>
- Ryu H & Kim YH. Measuring the quantity of harmful volatile organic compounds inhaled through masks. *Ecotoxic Environ Safety* 2023;256:114915 DOI:10.1016/j.ecoenv.2023.114915
- WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants. 2010. ISBN 9789289002134 <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/260127/9789289002134-eng.pdf>

<저자정보>

서혜경(교수)