타이어 화재 대응 소방관들의 휘발성유기화합물 노출 평가

김원[1†] · 최인자[1] · 조영환[1] · 정혜영[1] · 권지운[2] · 이소연[2]
[1]노동환경건강연구소, [2]국립소방연구원

노동환경건강연구소 Wonjin Institute for Occupational & Environmental Health

Introduction

소방관들은 화재 진압 활동 중에 다양한 유독 화학물질에 노출될 수 있다. 특히나 100여가지 물질로 만들어진 (Seidelt et al., 2006) 타이어가 연소할 때 휘발성 유기화합물(VOCs)을 포함한 여러 유독 화학물질이 배출되고 노출될 수 있다(Adolfson Associates, 1994; Reisman, 1997; Downard et al., 2015). 2023년 3월 12일 오후 10시에 대전에 소재한 타이어 공장에서 대응 3단계까지 발령된 대형 화재가 발생했다. 화재진압에 투입되는 소방관들은 이렇게 발생된 유해물질에 직·간접적으로 노출될 수 있는 위험이 매우 크다. 즉, 직접 진압활동 뿐만 아니라, 진압을 보조하는 작업을 하거나 주변에서 대기하면서도 노출될 수 있는 기회가 존재한다. 물론, 잔불정리를 하거나 원인조사를 하는 과정에서도 유해물질에 노출될 기회는 상존한다.



Objective

본 연구의 목적은 두가지이다.
첫째, 타이어 연소 과정에서 발생가능한 유해물질 중 VOCs를 중심으로 타이어 화재 진압작업을 수행한 소방대원들의 노출 수준을 평가한다.
둘째, 타이어 화재 진압 작업을 통해 노출되는 유해물질 수준이 평상시에 비해 어느 정도 차이 나는지를 평가함으로써 화재 진압작업으로 인한 직업적 유해물질 노출 가능성을 평가한다.

Method

1. 평가대상자

- 대형 타이어공장의 화재진압 참여 소방관들 중에서 ○○소방서에 재직하고 있는 14명의 소방대원(화재진압 직접참여 9명, 지원 5명)들이 본연구에 참여했다.
- 이들은 평균 41세 남성 대원들이었다. 4명은 실제로 화재진압 활동에 참여했는지 분명하지 않고 2명은 4시간 그리고 나머지 8명의 대원들은 10 시간이 넘게 화재진압 등에 참여했다.

2. 평가대상물질의 선정

- 타이어 화재에서 발생할 수 있는 물질들 중에서 유해성의 측면에서 의미가 있고 반감기가 짧은 물질로써 소변처럼 현실적으로 샘플링이 가능한 물질을 선정했다(Table1).

Tabel 1. Target metabolite of VOCs

VOC	Metabolite	Abbreviation	Half-life (hr)
Benzene	t,t-Muconic acid	t,t-MA	5
Toluene	Hippuric acid	HA	7.5
Styrene	Phenylglyoxiric acid	PGA	3-4
	Mandelic acid	MA	
Xylene	o-Methylhippuric acid	o-MHA	1-20
	m,p-Methylhippuric acid	m,p-MHA	

3.소변채취

- 연구의 취지를 설명한 후 연구에 참여하겠다는 소방관들을 대상으로 소변시료를 채취했다(녹색병원으로부터 인체유래물연구에 관한 심의위원회의 승인(IRB No. 1253-202301-BR-002-01)을 받았다).
- 화재현장 출동 후 다음날 아침 소변을 유해물질 노출 반영 소변으로 채취했고 일주일 후 휴무가 반영된 다음날의 소변을 baseline 소변으로 채취했다.

4. 뇨중 대사체 농도를 이용한 공기중 Benzene 농도추정

- Cui et al.(2022)이 제안한 공식(수식 1과 2)으로 벤젠의 뇨중 대사산물 농도를 이용해 노출 당시의 공기중 농도를 추정했다.

$$DI\mu g/day = \frac{UE(\mu g/g) \times CE(mg/kg/day) \times M(kg)}{F_{UE} \times 1000(mg/g)} \times \frac{MW_d}{MW_m} \quad (1)$$

$$BCABL(mg/m^3) = \frac{DI}{10m^3 \times 1{,}000 \times 50\%} \times k \quad (2)$$

Results

1. 뇨중 VOC 대사산물의 농도분포

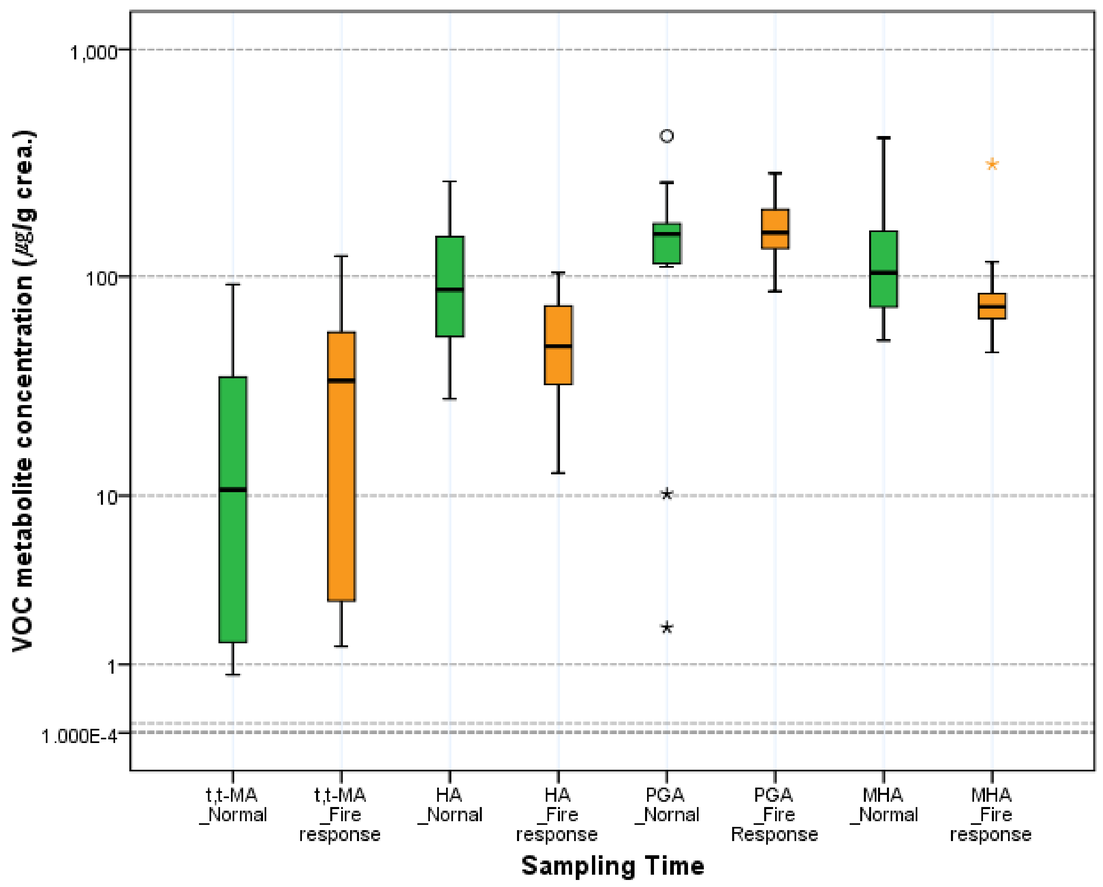


Figure 1. Target metabolite of VOCs

- 톨루엔, 스타이렌, 그리고 크실렌의 대사산물 농도는 화재진압 직후에 채취된 소변에서의 농도가 일주일 후에 채취된 소변에서의 농도에 비해 모두 통계적으로 유의하게 낮았다.
- 벤젠 대사산물의 경우는 화재진압 직후에 채취된 소변에서의 농도(중위값 34.2 μg/g crea.)가 일주일 후에 채취된 평상시 소변에서의 농도(중위값 10.9 μg/g crea.)에 비해 약 3배 정도 더 높았다. 그러나 통계적으로 유의하지는 않았다.
- Fent et al.(2018)의 연구결과에서처럼 작업 당시 공기 중에 벤젠 농도는 높았으나 다른 휘발성유기화합물의 농도는 낮았을 수 있다. 화재 진압 당시 공기중 VOC 측정값이 없어서 농도분포 차이에 대한 구체적인 원인을 단정적으로 찾기는 어렵다.

2. 화재진압 당시 벤젠 노출 농도 추정

- 뇨중 대사산물 수치를 통해 추정된 공기 중 벤젠 농도는 0.16 ppm(중위값)으로, 이는 미국산업안전보건연구원(NIOSH)이 권고하는 노출 기준(0.1 ppm)을 초과하는 수준이었다.
- 벤젠은 화재 현장에서 발생하는 연소물 중에서 다량으로 발생하는 물질 중 하나이기도 하지만 특히, 타이어 연소시에 벤젠, 톨루엔, 스타이렌, 그리고 크실렌과 같은 VOCs가 발생가능하기 때문에 이로 인해 타이어화재에 대응하는 소방관에게 벤젠 노출이 가능했던 것으로 해석된다.

Tabel 2. Estimated benzene exposure concentration of firefighters during firefighting and off-duty(ppb)

VOC	N*	Sampling time	Min	Max	Median	Mean±SD†	GM(GSD)‡
Benzene	14	After firefighting	ND	502.06	160.13	176.16±157.37	76.54(5.43)
		After off-duty	ND	487.51	51.03	103.39±134.49	36.10(5.61)

*N : Number of samples †Mean±S.D. : Arithmetic mean±standard deviation
‡GM(GSD) : Geometric mean(geometric standard deviation) §ND : Not detected

Conclusions

1. 이 연구는 소방관들이 화재 진압, 특히 타이어 화재 진압 중에 벤젠을 포함한 고농도의 VOC에 노출될 수 있음을 보여준다.
2. 이러한 결과는 소방관들이 직무 수행 중 유해 화학물질에 노출된다는 것을 입증하는 귀중한 자료로 활용될 수 있다.

Acknowledgements

이 연구는 2023년에 국립소방연구원의 지원을 받아 수행되었다(FRI-2023-SR-04). 대형 타이어 화재 대응으로 여념이 없는 와중에도 소방관들의 유해물질 노출실태 기록을 남기기 위해 본 연구에 참여해 주신 소방관들에게 깊은 감사를 드린다.