

미세먼지 및 유기화합물의 인체영향 연구

김정인¹⁾

서울특별시소방학교 소방과학연구실

Research of Health effects on Particle matter and Organic compounds

Jung-In, Kim

Fire Academy, Seoul Metropolitan Government

1. 서론

2005년 초에 발견된 공기호흡기 이물질에 대한 반향은 소방방재청의 전국점검²⁾과 전문기관 분석이 이루어지는 계기가 되었으며, 호흡보호장비 고시제정³⁾을 통한 소방관용 압축공기의 분석기준 지정과 분석실시 및 집중소 설치 등의 공기품질유지 및 관리방안을 통한 소방관의 호흡기 보호에 대한 노력이 이루어지고 있다. 기존 소방과학연구실의 호흡기 보호에 관한 연구⁴⁾는 호흡기 보호에 관련된 주요 흐름을 소개하고 외국 분석기준과 구 KS G 7009 스쿠버용 압축공기기준 비교 및 서울전체 소방관서에 대한 압축공기의 직독식 분석과 정밀분석을 통한 압축공기 속의 유기화합물 등 이물질이 존재한다는 사실을 입증하여 구 소방장비관리규칙 상의 공기분석기 보유 근거 및 공기기준 신설을 이끌어낸 기초가 되었고, 현 호흡보호장비 고시 상의 기준을 포함한 내용들에 반영될 수 있었다. 본 논문에서는 아직까지 국내에서 체계적으로 다루어지지 못한 소방관의 압축공기 호흡으로 인해 인체에 발생하는 영향에 대한 접근을 논문의 고유성 (Originality)으로 설정하였다. 전문기관의 분석결과에 기초하여 이물질 즉 고체형태의 분말에 있어 입경분석 결과와 대표되는 물질의 조성을 확인하고 미세먼지 기준과의 비교 및 주요 물질에 따른 인체에 미치는 영향을 조사하였으며, 검출된 주요 유기화합물에 있어 인체에 미치는 영향에 대하여 향후 호흡기 검사 또는 체계적인 연구의 필요를 제기하기 위해 기존 발표된 논문 근거들을 인용하여 논하였다.

1) E-mail : kjikmj@paran.com

2) 소방방재청 시설장비과-1228(2005.04.27)“소방장비 일제점검”

3) 소방방재청 고시 2005-60호(2005.08.05) “호흡보호장비 안전관리에 관한 기준고시”

4) 소방과학연구논문집 제5호 ISSN 1229-7186 (2003.12.20)“공기호흡기 충전공기에 관한 연구”

2. 연구방법

미세먼지 PM(Particulate Matter)기준과의 비교를 위한 입도분석에 있어서는 KIST (국립과학기술연구원) 특성분석센터의 Mastersizer Microplus Ver. 2.18을 이용한 분석결과에 대한 국립 부경대학교의 의견 간에 큰 차이가 없는 것으로 확인되었기에 원 분석자료인 KIST의 입도분석결과를 인용하여, 미국기준 (National Ambient Air Standard)과 비교하여 보았다. 또한 용기에 압축된 공기에 포함된 미세먼지 기준 적용을 위해 산출식을 통해 기준비교가 가능토록 하였고 인체에 미치는 영향을 있음을 확인하였다. 이물질의 대부분을 차지하는 산화알루미늄은 국립 부경대학교 공동실험실의 XRF 및 EPMA 분석결과와 MSDS 상의 TWA(1일 작업시간 가중 평균노출기준)값 등을 인용, 인체 영향을 기술하였다. 유기화합물의 경우 총 5개 시료에 대해 국립 부경대학교 다이옥신 연구센터의 GC/MS를 이용한 분석을 통해 주요 검출물질과 검출시간을 확인하였다. 최종적으로 인체에 대한 실험을 시행할 수 있는 여건의 부족을 보완하기 위한 대체방법으로 PubMed 논문검색을 통해 공기호흡기와 미세먼지 (PM), 유기화합물에 대한 근거들을 조사, 최종적으로 인체에 미치는 영향을 추정하여 보았다.

3. 결과 및 토의

3.1 미세먼지 PM (Particulate Matter)

System Details							
Sampler: Internal		Presentation: 50HMD		Analysis Model: Polydisperse		Modifications: None	
(Particle R.I. = (1.5285, 0.1000))		Dispersion R.I. = 1.3300]		Measured Beam Obscuration: 13.3 %		Refract: 1.710 %	
Result Statistics							
Distribution Type: Volume		Concentration = 0.0453 %Vol		Density = 1.000 g/cub.cm		Specific S.A. = 0.2957 sq. m/g	
Mean Diameters:		D [v, 0.1] = 11.48 um		D [v, 0.5] = 56.12 um		D [v, 0.9] = 134.39 um	
D [4, 3] = 65.50 um		D [3, 2] = 20.29 um		Span = 2.230E+00		Uniformity = 6.783E-01	
Size (um)	Volume Under %	Size (um)	Volume Under %	Size (um)	Volume Under %	Size (um)	Volume Under %
0.055	0.00	0.564	0.00	5.79	5.92	59.41	53.35
0.050	0.00	0.619	0.00	6.35	6.36	65.21	58.18
0.066	0.00	0.679	0.00	6.97	6.67	71.57	62.91
0.073	0.00	0.745	0.00	7.65	7.37	78.56	67.63
0.080	0.00	0.818	0.03	8.40	7.90	85.23	72.17
0.087	0.00	0.898	0.12	9.22	8.46	94.65	78.50
0.096	0.00	0.985	0.22	10.12	9.07	103.9	80.57
0.105	0.00	1.08	0.33	11.11	9.74	114.0	84.31
0.116	0.00	1.19	0.46	12.19	10.48	125.2	87.68
0.127	0.00	1.30	0.62	13.38	11.32	137.4	90.67
0.139	0.00	1.43	0.80	14.69	12.27	150.8	93.24
0.153	0.00	1.57	1.00	16.12	13.35	165.5	95.40
0.168	0.00	1.72	1.23	17.70	14.61	181.7	97.14
0.184	0.00	1.89	1.47	19.42	16.04	199.4	98.48
0.202	0.00	2.08	1.74	21.32	17.69	218.9	99.39
0.222	0.00	2.28	2.04	23.40	19.59	240.3	99.88
0.244	0.00	2.50	2.35	25.69	21.74	263.7	100.00
0.267	0.00	2.75	2.68	28.19	24.18	289.5	100.00
0.294	0.00	3.01	3.04	30.95	26.91	317.8	100.00
0.322	0.00	3.31	3.41	33.97	29.94	348.8	100.00
0.354	0.00	3.63	3.79	37.29	33.27	382.8	100.00
0.388	0.00	3.99	4.19	40.93	36.88	420.2	100.00
0.426	0.00	4.38	4.61	44.92	40.74	461.2	100.00
0.468	0.00	4.80	5.03	49.31	44.84	506.3	100.00
0.513	0.00	5.27	5.47	54.12	49.14	555.7	100.00

그림 1. 공기호흡기 내 무기물질 입도분석결과표

국립과학기술연구원의 입도분포결과⁵⁾를 보면 아래와 같이 분석에 사용된 시료의 총량

5) KAS-05154 (KIST)

은 밀도(Density)에서 1,000g/cub.cm 로 1g/m³ 임을 알 수 있다. 미세먼지 PM 10은 총량의 8.46% 환산하여 84.6mg/m³이 그리고 PM 2.5는 총량의 2.35% 즉 23.5mg/m³이 존재하는 것으로 확인되었다.

680 실린더 내부 이물질 입도 분포

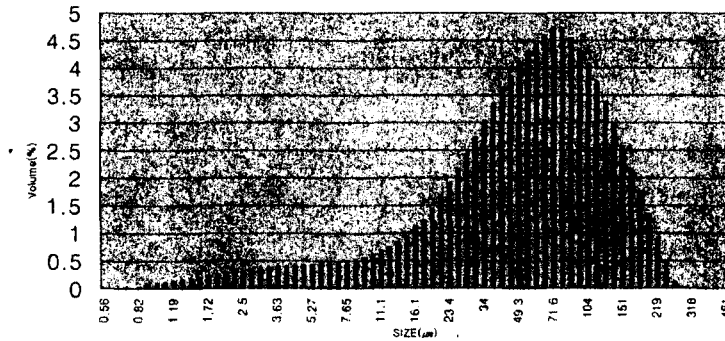


그림 2. 680 실린더 내 이물질 입도분포

미세먼지 PM 10은 2003년 Donaldson K 외 10명의 공동연구를 통해 폐혈관의 염증과 폐 손상 및 폐암, 심장질환의 유발 등이 보고되고 유전자 영향이 조직실험(In Vitro)에서 나타나는 등⁶⁾ 인체에 미치는 영향으로 인해 규제 대상이 되고 있다. 현행 미국 National Ambient Air Standard⁷⁾ 기준 중 2004년 Gong H 외 8명의 공동연구에서 200μg/m³ 농도에서 2시간의 단기노출 실험 시 동맥 내 산소포화도가 저하되고 말초혈액의 백혈구 세포 증가, 급성심질환의 발현 등이 보고되는 등⁸⁾ 그 입자가 폐 포까지 침투하여 혈액순환을 통해 신체로 확산되는 등 문제가 되고 있는 미세먼지 PM 2.5에 대해, 서울 및 국가 환경기준 상의 PM 10⁹⁾ 기준 및 공기호흡기 내에서 발견된 고체분말 중 미세먼지 PM 2.5 발생량을 대조하여 보면 다음과 같다.

표 1. 미세먼지 기준과 이물질 분석결과 비교 (24시간 폭로기준)

구분	PM 10 기준	PM 2.5 기준	환원기준	비고
미국	150μg/m ³	65μg/m ³	용기 내 미국기준 적용(30분) 14.3μg	미국기준 대비 약 30만배
서울	150μg/m ³	해당 없음		
한국	150μg/m ³	해당 없음		
분석결과	84.6mg/m ³	23.5mg/m ³		

위에서 미국 기준에 공기호흡기 용기 속에 압축된 공기를 비교하기 위한 환원기준의

6) Oxidative stress & calcium signaling in the adverse effects of environmental particle

7) National Ambient Air Quality Standard under Clean Air Act 1990 (amended)

8) Exposure of elderly volunteers with & without COPD to concentrated ambient PM 2.5

9) <http://air.seoul.go.kr/> 서울특별시 대기환경정보서비스

산술식은 다음과 같다. 먼저 1시간 성인 호흡량 공기 480 ℓ × 24시간 = 11,520 ℓ 에서 30분 공기호흡기 착용 시 240 ℓ 를 호흡하는 것으로 가정한다. 1m³ = 1,000 ℓ 이고 11 m³ = 11,000 ℓ 이므로 715(65×11)μg/m³ = 715μg/11,000 ℓ 으로, 1시간 용 용기를 1일 30분 흡입하는 것으로 가정하면 715의 1/50/m³ = 200 ℓ 으로 * 14.3μg/m³ = 14.3μg/200 ℓ 이 된다. 검출된 PM 2.5의 값인 23.5mg/m³은 미국의 단기노출기준과 비교하면 30만 배, 그리고 1년 단위 장기노출기준과 비교하면 약 130만배 높은 허용기준 초과가 되는 것으로 나타났다. 일반적인 황사가 200 ~ 300μg/m³인 것을 감안하면 초과의 정도를 짐작 할 수 있다. 공기호흡기 사용 시 미세먼지 전량이 방출되는 것은 아니고 호흡에 필요한 소량의 공기에 포함되어 방출되는 것으로 사료되나, 감시측면에서 최소한 허용기준을 넘는 미세먼지가 소방관 호흡기에 노출되는 것으로 가정하여야 할 것이다. 공식적으로 이 물질 발견 확인개소는 분석의 대상이 된 총 7개소와 육안으로 존재가 보고된 14개소가 있었으며 최근 PM 2.5의 경우 2005년 Johnson PR 외 1명의 연구를 통해 기존 PM 2.5 기준이 미국 8개주 일반인구의 16%만을 보호할 수 있는 수준이라는 보고¹⁰⁾가 있는 후 규제 강화가 예상된다.

3.2 이물질 중 주요성분 산화알루미늄 [Al(OH)3]

무기성분으로서의 알루미늄(Al) 조성은 XRD (X선회절분석기)로 정성되었으며, 성분별 정량은 XRF (X선형광분석기)로 정량되었다.¹¹⁾ 분석 결과는 다음과 같다.

표 2. XRF 성분분석 중 Al 및 기타화합물 비율 (단위 %)

구 분	가 대상	나 대상	다 대상	라 대상	마 대상
Al	81.33	87.69	54.02	84.56	86.46
기 타	Si (6에서 2) > s (5에서 2) > Cu (3에서 1) > Na > Fe 의 순				

이물질인 고체분말이 산화알루미늄이라는 근거는 EPMA (전자현미분석기 - 원소분석)에서 산소가 70에서 60 mol%, 알루미늄이 39에서 19 mol %의 결과가 나와 99 mol %가 산화알루미늄으로 입증되었다. 본 연구에서는 주 성분인 산화알루미늄에 대해 한국산업 안전공단의 물질안전보건자료를 인용하였다.

물질안전보건자료 상에서 나타난 바와 같이 흡입할 경우 호흡기자극을 포함한 증상이 발현될 수 있고, 발암성은 현재까지 규정되고 있지 않으며, 표적장기에 대해서도 위험이 보고된 바는 없다. 보건상의 위험요인을 감안, NFPA 보건 1등급이 설정되어 있으며, 3-1 미세먼지에서 확인한 미세먼지 PM 10이 84.6 mg/m³이었음을 인용하면 TWA 기준을 약 17배 초과하고 있는 것이다. 추적조사 및 향후 연구에 호흡기 자극, 열 및 호흡곤란이 기본관찰 증상이 될 것으로 보인다.

10) Fine particulate matter national ambient air quality standard : public health impact

11) 다이옥신연구센터-125 (2005.06.14)

표 3. 물질안전보건자료 (산화알루미늄)

구 분	내 용
1. 물 질 명	산화 알루미늄 (Aluminum Oxide)
2. CAS 번호	1344 - 28 - 1
3. 동의어	알루미나, 알런덤, 알루미트
4. 화학물질군	금속 산화물
5. 위험유해성	표적장기에 위험성 보고된 바 없음
6. 단기노출	호흡기 자극, 열, 호흡곤란
7. 장기노출	호흡기 자극, 호흡곤란
8. NFPA 등급	보건 1등급 (0에서 4단계)
9. 발암성	국제발암성 연구소 (해당 없음)
10. 노출기준	5mg/m ³ (호흡성 분진 분율) 미국 직업안전보건국

3.3 유기화합물 (Organic Compounds)

GC/MS를 이용한 유기성분 분석은 10분대 이전과 30분대 이후의 오일성분이 가장 많은 부분을 차지하였으며, 그 외 8.867분의 Dimethyl Dodecamine과 같은 질소화합물이 많았으며, Dibutyl phthalate 계열 화합물의 농도가 높았으며, 11.175분의 Benzenesulfonic acid butyl amide, Trioctyl phosphate 등의 질소, 황, 인계열의 화합물이 검출되었다. 질소계 및 인, 황계 화합물 형태에 의해 충전기 내 공기의 냄새를 유발하는 원인이 될 수 있고 추가적인 유해성 검토가 필요할 것으로 사료된다. 시료인 고체분말은 3-2의 산화알루미늄 분석에 사용된 것과 동일한 대상 5개소의 것으로 대체로 유기계화합물의 분자량이 크고 저분자량 유기화합물은 가스 상에서 호흡공기로 배출 흡입될 수 있을 것이며, 잔존 고분자량 화합물은 용기내부 입자에 흡착된 잔존물로 추정된다. 주요 검출화합물에 있어 인체에 미치는 영향을 조사한 바 다음과 같았다.

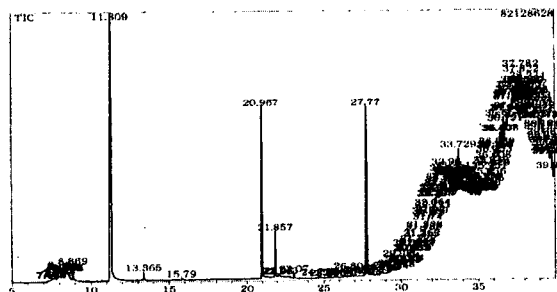


그림 3. 전체 시간대별 피크

3-3-1. Benzenesulfonic acid butyl amide

Benzenesulfonic acid butyl amide의 경우 N-butyl benzenesulfonamide 와 동일한 화학중합체의 가소제 (CAS 번호 3622-84-2)로서 1991년 미국 보건연구원 (NIH)의 Strong MJ

의 5명의 공동연구를 통해 동물실험을 통한 운동기능을 저하시키는 신경독성이 있는 것으로 보고되어 인체에 대한 독성여부에 대해 그 안전성이 주목된 바 있고, Strong MJ 는 동물실험을 통해 이러한 독성이 유전된다고 보고한 바 있다. 1995년 Lee WY 외 4명의 공동연구에서는 동물실험을 통해 역시 운동기능의 일반적인 저하현상을 발표한 바 있다.

3-3-2. Trioctyl Phosphate

Trioctyl Phosphate(인계 난연제)의 경우 최근에 보고된 연구결과는 없으며 1982년 Oishi H 외 2명의 동물실험을 통해 일부 장기의 중량 감소 및 혈액학적 수치 및 혈청의 변화가 관찰된 것이 유일하다. 그 외 Dibutyl Phthalate (가소제)에 대해서도 역시 구체적인 연구결과는 발견되지 않았다.

4. 결론

미세먼지의 경우 정밀분석 대상인 7개소와 육안 관찰된 14개소가 20개를 넘는 통계학적 유의미성을 갖는 수이나 동일하게 입도분석을 시행하지 못한 한계가 있으며 본 연구에서는 하나의 개소에 대한 입증이라는 의미를 부여할 수 있을 것이다. 미세먼지는 공기 압축에서 발생하는 가압과 사용 시 압력감소, 보관 및 사용 중의 충격이나 내부에서의 입자의 충돌 등으로 인해 기존에 용기 내벽에 형성된 산화알루미늄이 깨져나가면서 미세 입자가 생성되는 것으로 사료되며, 현재 진행 중인 용기세척을 통해 기존 미세먼지와 고체분말은 소멸될 것으로 예상되나 현재까지 노출된 소방관들에 대한 호흡기 영향 평가가 별도로 시행되어야 할 것으로 보인다. 특수건강검진결과가 연구의 보조 자료로 활용될 수도 있을 것이며, 호흡기 관련 설문이나 특정대상에 대한 호흡기 검사가 이루어져야 할 것으로 사료된다. 알루미늄의 경우 TWA를 초과하는 양이 흡입되었을 것으로 의심되고 인체에 호흡기전을 통해 미치는 영향을 검토하여야 할 것이다. 유기화합물의 경우도 각 물질별 접근이 이루어져야 할 것으로 사료된다. 911 이후 미국의 경우 소방관에 대한 14종의 화학물질 노출 여부를 소변과 혈액을 통해 검사¹²⁾하는 사례가 보고되는 등 대사산물을 이용한 연구도 일반화되고 있다. 소방관은 건강한 근로자 효과 (Healthy Worker Effects)가 예상되는 집단으로 초기 검사결과는 일반인보다 좋게 나오는 경향이 있을 것으로 예상되는 바 이를 인지하여 장기적인 연구가 이루어져야 할 것이며, 1991년 Beaumont JJ 등 6명의 소방관으로 30년간 복무한 3,066명에 대한 발암 등 사망률 역학연구¹³⁾사례나 1999년 Burgess JL 등 7명의 공동연구에서 8년간 812명의 소방관에 대한 호흡기능을 검사¹⁴⁾한 것을 볼 때 호흡기를 포함한 소방관의 보건을 대상으로 하는 역학적 연구의 시작이 절실히 요구됨을 알 수 있다. 이외에도 관리적인 측면에서 부식이 발생한 용기의 세척 이후에 부식의 재발생과 용기의 내압변화(내구력 저하로 인한)를 감시하여

12) Biomonitoring of chemical exposure among New York city firefighter

13) An epidemiology study of cancer & other causes of mortality in SC firefighters

14) Longitudinal decline in measured firefighter single-breath diffusing capacity

이상용기의 폐기 및 신규용기의 도입이 필요할 것이며, 집중소 설치 전까지 기존 충전기들에 대한 공기분석으로 용기 내 산화 및 유기화합물의 직간접적인 원인이 된 과도한 수분을 현행의 호흡보호장비 고시 18 μ mg/m³ 기준으로 엄격하게 유지하려는 노력이 수반되어야 할 것이다.

5. 감사의 글

정밀분석 및 결과분석에 도움을 주신 부경대학교 다이옥신 연구센터 옥곤 교수님과 독성에 대해 지도해주신 서울대학교 보건대학원 백도명 교수님, 논문검색을 지도해주신 서울대학교 환경의학연구소 이경호 연구원님께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

참고문헌 주석대치, 인용논문 PubMed 등록번호 첨부, ()안 주석번호

1. PubMed : PMID 1275847(6), 16036744(8), 16140618(10), 14644665(12), 2008922(13), 9872828(14)