

폐기물 소각장 근로자의 유해요인과 건강영향조사

박철용 · 사공준 · 백기욱 · 곽경민 · 김승남
손수호 · 조성민 · 배성진 · 김민균

OSHRI

산업재해예방
안전보건공단
산업안전보건연구원



폐기물 소각장 근로자의
유해요인과 건강영향조사

산업재해예방
안전보건공단
산업안전보건연구원



OSHRI

연구보고서

폐기물 소각장 근로자의 유해요인과 건강영향조사

박철용·사공준·백기욱·곽경민·김승남
손수호·조성민·배성진·김민균

산업재해예방

안전보건공단

산업안전보건연구원



제 출 문

산업안전보건연구원장 귀하

본 보고서를 “폐기물 소각장 근로자의 유해요인과 건강
영향조사”의 최종 보고서로 제출합니다.

2021년 10월

연구진

연구기관 : 영남대학교 의과대학

연구책임 : 박철용 (조교수, 영남대학교 의과대학)

자 : 사공준 (교수, 영남대학교 의과대학)

연구원 : 백기욱 (전임의, 고려대학교안산병원)

: 광경민 (임상교수, 고려대학교안산병원)

: 김승남 (팀장, 고려대학교안산병원)

: 손수호 (전공의, 영남대학교병원)

: 조성민 (전공의, 영남대학교병원)

: 배성진 (전공의, 영남대학교병원)

: 김민균 (전공의, 영남대학교병원)

요 약 문

- 연구 기간 2021년 4월 ~ 2021년 10월
- 핵심 단어 소각장, 자원회수시설, 폐기물, 다이옥신
- 연구과제명 폐기물 소각장 근로자의 유해요인과 건강영향조사

1. 연구배경

2020년 환경부 통계자료에 따르면, 매년 생활폐기물의 발생량, 처리량은 늘고 있는 추세이다. 이와 함께, 각 지자체에서는 각 행정구역에서 나온 폐기물은 원칙적으로 해당 지역에서 처리하는 것을 표방하여 각 지자체별로 소각시설이 다양한 규모로 설립되어 있다. 2019년도 전국 폐기물 처리업체 현황통계에서, 생활폐기물을 주로 소각하는 폐기물 공공소각시설 현황을 살펴보면 전남 53개소, 경기 27개소, 서울 5개소, 부산 2개소, 대구 1개소 등, 전국 180개소의 소각시설이 신고되어 있고, 지정폐기물의 소각시설은 전국 21개소가 운영되고 있다. 대도시의 소각시설일수록 하루 처리량이 더 큰 경향이 있는데, 하루 적게는 50톤에서 최대 900톤까지 처리하는 소각시설이 확인된다. 2019년 기준, 전국의 생활폐기물 소각시설 180개소에서 약 460만톤의 생활폐기물이 처리되었으며, 이는 하루평균 12,600톤으로 계산된다.

전국 소각시설의 시설관리 인력으로 등록되어 있는 인원은 3,998명으로 되어 있으나, 관련 협력업체와 재활용 분류, 음식물 쓰레기 처리 관련 인원까지 합치면 그 수는 약 1만여명으로 추정된다. 유해인자가 비교적

명확히 알려져 있는 제조업이나, 종사자 수가 많고, 정책과 사회상황에 따라 이슈가 되는 특정 서비스업 종사자와 달리, 소각장 근로자에 대한 연구는 소외되고 있다. 오히려, 인근 지역주민에 대한 건강영향조사 사업은 주민들의 우려와 민원을 해결하려는 목적으로 장기간 코호트 연구의 성격으로 진행이 되고 있다.

대부분의 소각시설은 해당 지역자치단체에서 민간투자사업으로 장기 용역을 주어 운영하고 있고, 각 운영업체에서는 소속 근로자들을 대상으로 특수건강검진과 사업장의 작업환경측정이 실시되고 있는 것으로 추정되나, 소각장에서 발생할 수 있는 여러 중금속, 다이옥신 등을 포함한 유해인자에 대한 평가는 지역주민의 건강영향평가보다 오히려 적은 항목으로 시행되고 있고, 역학적 근거 자료가 부족한 것이 현실이다. 산업안전보건연구원의 관련 연구과제를 살펴보면 2002, 2004, 2007년의 연구과제에서 전국규모의 연구를 실시한 이후, 관련 후속연구는 진행이 되고 있지 않았다.

이후, 시간이 경과함에 따라 노후화된 소각시설이 늘어가는 한편, 최근에는 대규모 소각시설이 신설되고 있다. 또한, 각 지방자치단체에서는 소각장 인근 지역주민들의 건강영향조사 사업이 활발히 지속되고 있는 가운데, 청주시 북이면 사례와 같이 인근 지역주민의 집단 암 발병에 관한 주민 역학조사가 환경부의 주관으로 장기적으로 진행되고 있다. 그러나, 소각장과 가장 밀접하게, 최일선에서 근무하며, 장기간 관련 유해인자에 노출되어 온 근로자에 대한 건강영향조사는 거의 실시되지 않았다. 따라서, 폐기물 소각시설에서 발생할 수 있는 유해인자의 정성적, 정량적 평가, 노출수준을 확인하고, 소각장 근로자들에게 미치는 영향을 파악하는 한편, 소각시설 근로자에 다양한 유해요인에 대한 평가를 하고자 한다.

2. 주요 연구내용

○ 기초자료 조사

- 전국 소각장 현황, 통계자료 제시, 문헌고찰을 통해 소각장 관련 유해 인자의 기초자료를 확인하였다.
- 소각장 유해인자 관련 세포기능과 손상, 다이옥신, 중금속, 다환방향족탄화수소, 발암성, 생식독성 등에 대한 문헌고찰을 하였다.

○ 연구대상 소각장 내 작업환경 측정 실시

- 대표성, 비교성이 있는 국내 폐기물 소각장 3개소의 주요 지점별 총분진, 중금속(납, 수은, 카드뮴 등), 유기용제(벤젠, 톨루엔, 크실렌), PAHs, 다이옥신 측정하였다.
- A, C 소각장의 소각로 상부에서 실시한 기중 다이옥신은 0.550, 0.989pg I-TEQ/Sm³ 으로 측정되었다. 이는 환경부에서 제시한 일반 대기기준 0.6pg I-TEQ/Sm³에 육박하거나 초과하는 수준이었다.
- 총분진, 중금속, 유기용제의 측정결과는 작업환경 기준을 초과하는 항목은 확인되지 않았다. PAHs의 경우 53.9-681.11ng/m³로 공단지역의 대기 수준보다 높게 나타났고, 벤조(a)피렌 또한, 일부 지점에서 5.37ng/m³으로 유럽연합 기준(1ng/m³)이나, WHO의 기준(0.12ng/m³)을 크게 초과하였다. 그러나 과거의 연구나, 비교대상을 실외 대기환경이 아닌 다른 사업장의 작업환경과 비교하면, 측정된 총 PAHs의 범위가 월등히 높지는 않았다.

○ 근로자 노출실태 분석

- 3개의 소각장에서 총 68명의 근로자의 체내 중금속(요중 납, 카드뮴, 수은), PAHs 대사산물, 요중 8-OHdG, 프탈레이트를 분석하였다. PAHs 대사산물, 프탈레이트는 과거 연구나 일반인구와 비교할 때 유의하게 높게 나타난 항목은 없었다. 요중, 납, 수은, 카드뮴도 노출 기준을 초과하는 수준의 결과는 없었으나, 국민건강영향조사의 일반인구에 비해서 높은 수준의 결과가 확인되었다.
- 다이옥신 측정결과가 가장 높게 나온 소각장의 경력이 길고, 현장 근무에 주로 종사한 근로자 10명을 대상으로 혈중 다이옥신 검사를 실시하였다. 다이옥신 동족체의 상대독성을 고려하고 지방을 보정한 혈중 총 다이옥신의 농도는 2.184- 9.134 pg TEQ/g-lipid의 범위로 나타났고, 평균 5.230 pg TEQ/g-lipid, 중위수는 5.063 pg TEQ/g-lipid 이었다. 조사대상 근로자의 연령대를 고려하여 40대 인근 지역주민의 혈중 다이옥신의 농도인 4.72 pg TEQ/g-lipid 와 비교하면 근로자의 혈중 다이옥신은 이보다 약간 높은 것으로 평가되었다.
- 총 다이옥신의 농도는 소각장 근로자와 인근지역주민과의 큰 차이가 없으나 동족체의 성상을 살펴보면, 2,3,7,8-TCDD의 농도 차이가 약 14배 이상 나타나는 등, 큰 차이를 보였다. 이는 소각장 내의 기중 다이옥신과 인근지역 대기의 다이옥신의 성상차이를 반영하는 결과로 해석되었다.
- 설문조사에서 PHQ-9을 활용한 우울지수 조사에서 소각장 근로자들은 일반인구에 비해 높은 PHQ-9 점수와 우울 위험군의 비율을 보였다. 또한 작업환경 만족도와 신뢰도는 같은 설문문항으로 수행한 2007년도의 결과에 비해 부정적인 답변이 더 많았다. 그러나 소각시설의 안정성 인식도와 안전보건교육 실시에 대한 평가는 긍정적인 답변이 더 많았다.

3. 연구 활용방안

- 폐기물 소각장 근로자의 유해인자와 노출수준에 대한 평가를 통해, 현재의 작업환경측정, 특수건강검진의 적절성을 확인하고, 보완, 개선방안에 활용할 수 있을 것이다.
- 향후 발생할 수 있는 소각장 근로자의 직업성 질환 역학조사의 보완, 참고자료(Back Data)로 활용할 수 있을 것이다.
- 기존에 축적되어온 소각장 주변 주민 건강영향조사 자료와 함께, 주민들과의 위해성 소통(Risk communication)에 양성 대조군(Positive control)으로서 활용할 수 있을 것이다.

4. 연락처

- 연구책임자 : 영남대학교 의과대학 조교수 박철용
- 연구상대역 : 산업안전보건연구원 직업건강연구실 대리 최영화
 - ☎ 052)703-0876
 - E-mail : luvcyh@kosha.or.kr

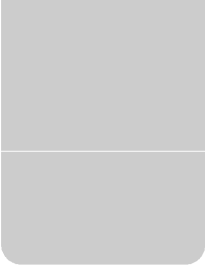
목 차

I . 서론	1
1. 연구배경 및 필요성	3
1) 연구배경	3
2) 연구의 필요성 및 목적	7
2. 연구목표	8
II . 연구방법	11
1. 국내 소각시설 일반현황	13
2. 조사 대상 소각시설과 측정지점	15
1) A 소각장	18
2) B 소각장	18
3) C 소각장	19
4) 소각로의 운영방식	20
2. 분석방법	21
1) 다이옥신	21
2) 다환방향족탄화수소(Polyaromatic Hydrocarbons, PAHs)	33

목 차

3) 다이옥신과 PAHs 정도관리, 정도보증	36
4) 중금속	38
5) 유기용제(벤젠, 톨루엔, 크실렌)	39
6) 총분진	40
7) 요중 중금속	41
8) 요중 PAHs 대사산물	43
9) 요중 프탈레이트	46
10) 요중 8-OHdG	49
3. 기타사항	49
 III. 연구결과	 51
1. 국·내외 연구동향	53
1) 다이옥신과 퓨란(PCDD/Fs)	54
2) 중금속	58
3) 다환방향족탄화수소(PAHs)	60
4) 발암성	62
5) 생식독성	68
6) 기타질환	71

2. 사업장별 작업환경측정 결과	80
1) 다이옥신	80
2) 다환방향족탄화수소(PAHs)	84
3) 중금속	91
4) 유기용제	93
5) 분진	95
6) 작업장 내 온도	96
3. 설문조사를 통한 근로환경 및 인식도 조사	97
1) 조사 대상 근로자의 일반적 특성	97
2) 근무자 작업관련 특성 및 작업관련 인지도	99
3) PHQ-9을 이용한 우울 수준 평가	106
4. 근로자 생체시료 분석 결과	107
1) 혈중 다이옥신	107
2) 소변 중 PAHs 대사체	110
3) 소변 중 중금속(납, 수은, 카드뮴)	111
4) 소변 중 프탈레이트	112
5) 일반 인구집단과 비교	113
6) 소변 중 8-OHdG	114



목 차

IV. 고찰 및 제언	115
1. 연구결과 요약	117
1) 다환방향족탄화수소(PAHs)	120
2) 다이옥신	123
3) 중금속	132
4) 요중 8-OHdG와 프탈레이트	133
5) 그 밖의 유해인자	134
2. 제한점	138
3. 제언	139
참고문헌	139
Abstract	148
부 록	150

부록 1. 설문지	150
-----------------	-----

표

<표 I-1> 연도별 전체 폐기물 발생과 처리방식 현황	3
<표 I-2> 연도별 생활 폐기물 발생과 처리방식 현황	5
<표 II-1> 소각장별 각 작업환경 측정인자의 측정지점	15
<표 II-2> 다이옥신류 물질정보	23
<표 II-3> 다이옥신류 분석정보	26
<표 II-4> Column Chromatography 조건	28
<표 II-5> GC 분석 조건(VF-Xms)	29
<표 II-6> GC 분석 조건(DB-DIOXIN)	30
<표 II-7> MS 분석 조건(VF-Xms)	30
<표 II-8> MS 분석 조건(DB-DIOXIN)	31
<표 II-9> 내부표준물질 종류 및 첨가량	31
<표 II-10> 분석대상 PAHs	34
<표 II-11> 매질별 방법검출한계 Spiking 농도	38
<표 II-12> 요중 납 분석조건	41
<표 II-13> 요중 카드뮴 분석조건	42
<표 II-14> 요중 수은 분석조건	43
<표 II-15> 분석대상 요중 PAHs 대사산물	43
<표 II-16> 소변 중 PAHs 대사체 분리조건 (GC)	44
<표 II-17> 소변중 PAH 특정이온 선택 조건 (MS)	45
<표 II-18> 소변 중 다환방향족탄화수소 대사체 검정곡선 농도 및 검출한계	45

<표 II-19> 요중 프탈레이트류 분석대상 물질 8종	46
<표 II-20> 소변 중 프탈레이트 대사체 분리조건 (HPLC)	48
<표 II-21> 특정이온 선택조건 (MS)	48
<표 II-22> 소변 중 프탈레이트 검정곡선 농도 및 ISTD, 검출한계	49
<표 III-1> 소각장 근로자의 직업병 사례	53
<표 III-2> 다이옥신 관련 문헌	56
<표 III-3> 중금속 관련 문헌	59
<표 III-4> 다환방향족탄화수소 관련 문헌	61
<표 III-5> 발암성 관련 문헌	65
<표 III-6> 생식독성 관련 문헌	69
<표 III-7> 기타질환 관련 문헌	74
<표 III-8> A 소각장 소각로 상부의 다이옥신, 퓨란류 측정결과 ..	80
<표 III-9> B 소각장 투입호퍼의 다이옥신, 퓨란류 측정결과	82
<표 III-10> C 소각장 소각로 상부의 다이옥신, 퓨란류 측정결과 ..	83
<표 III-11> A 소각장 소각로 상부의 PAHs 측정결과	85
<표 III-12> A 소각장 투입 호퍼의 PAHs 측정결과	86
<표 III-13> B 소각장 투입 호퍼의 의 PAHs 측정결과	87
<표 III-14> B 소각장 바닥재 집결지의 PAHs 측정결과	88
<표 III-15> C 소각장 소각로 상부의 PAHs 측정결과	89
<표 III-16> C 소각장 바닥재 집결지의 PAHs 측정결과	90
<표 III-17> A 소각장 중금속 측정 결과	91

표

<표 III-18> B 소각장 중금속 측정 결과	92
<표 III-19> C 소각장 중금속 측정 결과	92
<표 III-20> A 소각장 측정 장소별 유기용제 측정결과	93
<표 III-21> B 소각장 측정 장소별 유기용제 측정결과	94
<표 III-22> C 소각장 측정 장소별 유기용제 측정결과	94
<표 III-23> 소각장별, 측정 장소별 총분진 측정결과	95
<표 III-24> 고온작업의 작업별 노출기준, 휴식시간비	96
<표 III-25> 조사 대상 근로자의 일반 특성	98
<표 III-26> 조사 대상 근로자의 부서 근무기간 및 설문조사	99
<표 III-27> 조사 대상 근로자의 우울수준(PHQ-9)	106
<표 III-28> 혈중 다이옥신 검사 대상 근로자 일반특성	108
<표 III-29> 근로자들의 혈중 다이옥신류 농도	109
<표 III-30> 소각장별 근로자의 소변중 PAHs 대사체 분포	111
<표 III-31> 소각장별 근로자의 요중 중금속 농도	111
<표 III-32> 소각장별 요중 프탈레이트 결과	112
<표 III-33> 소각장 근무자와 대조군(일반인구)의 요중 PAHs 대사산물, 프탈레이트, 중금속 비교	113
<표 IV-1> A 소각장의 최근 3년간의 작업환경측정 결과	118
<표 IV-2> C 소각장의 최근 3년간의 작업환경측정 결과	119
<표 IV-3> 서울지역 소각장 주변 지역의 대기 중 다이옥신(2020년)	124

<표 IV-4> C 소각장 내부 다이옥신과 인근 6개 지역 지점별 대기 중 다이옥신 비교(2020년)	125
---	-----

그림목차

[그림 I-1] 폐기물관리법상 폐기물 분류 체계	4
[그림 I-2] 연도별 폐기물 발생현황과 배출원 현황	4
[그림 II-1] 지역별 폐기물 발생량 비교	13
[그림 II-2] 지역별 1인당 하루 생활폐기물 발생량 비교	14
[그림 II-3] 소각장의 모식도와 주요 측정지점	17
[그림 II-4] A 소각장 운영 모식도	18
[그림 II-5] B 소각장 운영 모식도	19
[그림 II-6] C 소각장 운영 모식도	20
[그림 II-7] 환경대기 중 다이옥신류 및 PAHs 시료 채취방법	22
[그림 II-8] High volume air sampler의 모식도	25
[그림 II-9] 고용량 공기시료채취기를 이용한 다이옥신과 다환방향족탄화 수소 측정(소각로 상부)	26
[그림 II-10] 다층실리카겔 컬럼과 알루미나 컬럼	28
[그림 II-11] 혈액 중 다이옥신류 분석 방법 모식도	32
[그림 II-12] PAHs 분석 방법 모식도	33
[그림 II-13] 소변 중 PAHs 대사체 분석절차 및 분석기기 (Clarus 680-SQ8T, Perkin Elmer, US)	44
[그림 II-14] 소변 중 프탈레이트 대사체 분석절차 및 분석기기 (Agilent 6490, Agilent, Palo Alto, CA, USA)	47
[그림 III-1] 반건식 반응탑의 WBGT 측정(36.2℃)	97
[그림 III-2] 근무환경 만족도	102

[그림 III-3] 소각시설의 안정성 인식도	103
[그림 III-4] 사업주의 작업환경개선 관심도	104
[그림 III-5] 안전보건교육 실시 현황	104
[그림 III-6] 소각장 근무환경에서의 주관적 유해요인	105
[그림 IV-1] C 소각장과 인근지역의 다이옥신 동족체별 농도비교(pg I-TEQ/Sm ³)	126
[그림 IV-2] 소각장 근로자와 인근지역의 주민의 혈중 다이옥신 동족체별 농도비교(pg WHO-TEQ/g-lipid)	127
[그림 IV-3] 서울시 대기중 총 다이옥신 농도 추이	129
[그림 IV-4] 서울시 거주민의 혈중 다이옥신 농도 변화	130
[그림 IV-5] 크레인실 근로자의 작업 자세	136
[그림 IV-6] 조종실에서 바라보는 크레인과 피트	136

I. 서론

.....

I. 서론

1. 연구배경 및 필요성

1) 연구배경

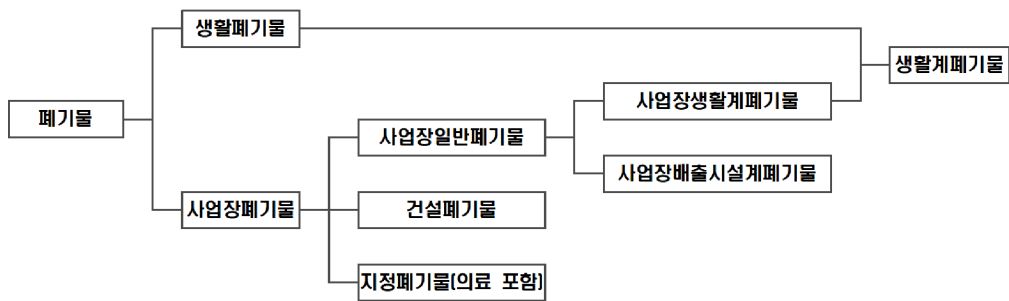
2020년 환경부 통계¹⁾에 따르면 2019년 우리나라의 폐기물 발생현황은 하루에 49만 7천톤이 발생하며 매년 증가하는 추세에 있다. 이 중 80% 이상이 재활용으로 처리되고 있으나, 25,894톤(5.2%)은 소각으로 처리하고 있다.

<표 I -1> 연도별 전체 폐기물 발생과 처리방식 현황

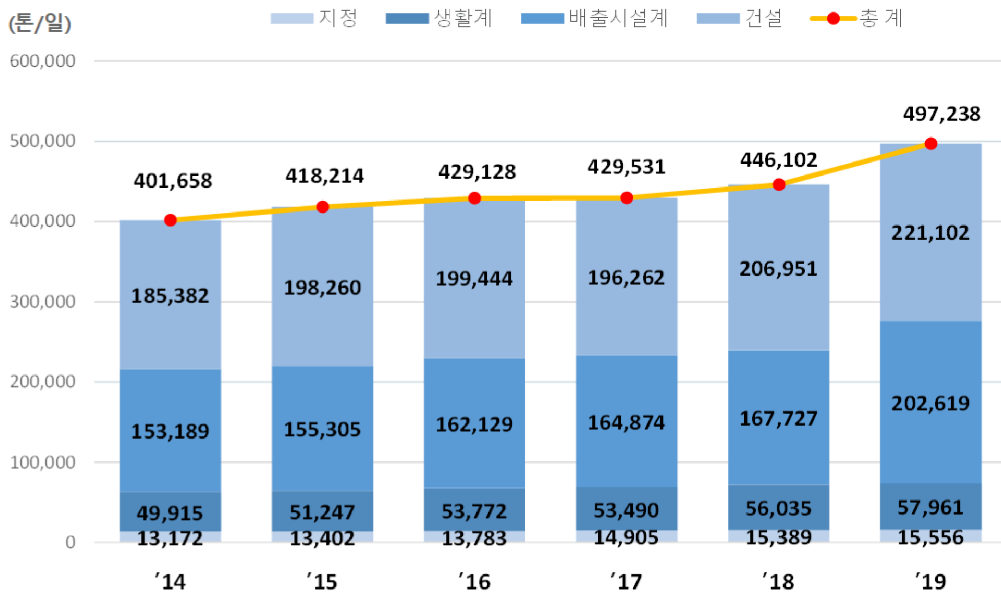
연도	구분	총계	매립	소각	재활용	기타
2014	발생량	401,658	37,906	24,524	336,814	2,414
	%	100.0	9.4	6.1	83.9	0.6
2015	발생량	418,214	37,800	26,085	352,824	1,505
	%	100.0	9.0	6.2	84.4	0.4
2016	발생량	429,128	37,942	26,450	363,800	936
	%	100.0	8.8	6.2	84.8	0.2
2017	발생량	429,531	35,524	26,290	366,650	1,067
	%	100.0	8.3	6.1	65.4	0.2
2018	발생량	446,102	34,648	26,404	384,237	813
	%	100.0	7.8	5.9	86.1	0.2
2019	발생량	497,238	30,514	25,984	430,345	10,395
	%	100.0	6.1	5.2	86.6	2.1

1) 환경부, 한국환경공단, 전국 폐기물 발생 및 처리 현황(2019년도), 2020

폐기물 관리법상 폐기물은 “쓰레기·연소재·오니·폐유·폐산·폐알카리·동물의 사체 등으로서 사람의 생활이나 사업 활동에 필요하지 아니하게 된 물질”로 정의하며, 생활폐기물과 사업장폐기물로 크게 나뉜다<그림 I-1>. 사업장 폐기물은 다시 사업장 일반폐기물, 건설폐기물, 지정폐기물(의료 포함)으로 나뉘는데, 폐기물 중 가장 큰 비중은 건설폐기물이 2019년도 기준 221,102톤으로 44.5%를 차지하였다.



[그림 I-1] 폐기물관리법상 폐기물 분류 체계



[그림 I-2] 연도별 폐기물 발생현황과 배출원 현황

전체 발생하는 폐기물에서 소각으로 처리되는 비율이 비교적 낮으나, 생활폐기물에서 소각이 차지하는 비율은 25% 수준으로 증가한다.

<표 I-2> 연도별 생활 폐기물 발생과 처리방식 현황

구 분		총 계	매 립	소 각	재활용	기 타
2014	발생량	49,915	7,813	12,648	29,454	-
	%	100	15.7	25.3	59	-
2015	발생량	51,247	7,719	13,176	30,352	-
	%	100	15.1	25.7	59.2	-
2016	발생량	53,772	7,909	13,610	32,253	-
	%	100	14.7	25.3	60	-
2017	발생량	53,490	7,240	13,318	32,932	-
	%	100	13.5	24.9	61.6	-
2018	발생량	56,035	7,525	13,763	34,747	-
	%	100	13.4	24.6	62	-
2019	발생량	57,961	7,336	14,919	34,613	1,093
	%	100	12.7	25.7	59.7	1.9

폐기물의 처리방식으로, 소각으로 처리되는 폐기물의 비중이 꾸준히 증가하는 추세이나, 2010년에 비해 2019년도 기준 전국 폐기물 공공 소각시설의 개수는 176개소에서 180개소로 4개소만 증가한 것으로 확인되었다. 그러나 시설별 처리용량을 살펴보면, 16,081톤/일에서 18,609톤/일로 15.7% 증가하였다²⁾. 이는 최근에 지어지는 소각장들의 기술적 개선과 처리용량의 증가가 반영된 것으로, 실제로 2015년 이후에 설립되어 운영되는 소각장을 살펴보면 일 300톤 이상의 처리용량을 갖춘 대규모 소각 시설이다. 이와 함께 소각에서 발생한 폐열로 발전시설을 갖추는 한편, 처리현황, 배출가스 등의 정보를 TMS시스템을 통해 전광판으로 상시

2) 한국환경공단, 전국폐기물 발생 및 처리현황(생활, 사업장일반) 2019년

공개하며 운영하고 있다. 일부 시설에서는 전망대, 수영장, 체육시설 등의 주민편의시설까지 확충하여 종합편의시설로서의 역할을 수행하기도 한다.

그러나 소각장에서 발생할 수 있는 유해가스, 분진, 중금속 등에 대한 부정적 인식으로 여전히 소각시설은 인근 지역주민들로부터 혐오시설로 평가받고 있는 것이 사실이다. 해당 지역자치단체에서는 인근 지역 주민들의 부정적 인식을 불식하고 민원을 해결하는 노력의 일환으로 인근 거주민들의 객관적인 데이터 확보와 위해성 소통(Risk communication)을 위해 건강영향 평가를 주기적 사업으로 장기적으로 수행해오고 있다. 건강영향평가의 내용을 살펴보면 소각시설의 배기가스에서 배출되는 분진, 중금속, 다환방향족탄화수소, 다이옥신 등에 대한 건강영향에 중점을 두고 있다. 이러한 주민건강영향평가 사업은 지역마다 차이는 있겠으나 대체로 선제적인 대응, 선진화된 행정사업으로 평가받고 있다.

그러나 인근 주민들보다 더 밀접하고 가까운 거리 또는 소각장 내부에서 근무하고 있는 소속 근로자들에 대한 건강영향평가는 오히려 소외되고 있다. 대부분의 소각시설은 해당 지역자치단체에서 민간투자사업으로 장기 용역을 주어 운영하고 있고, 각 운영업체에서는 소속 근로자들을 대상으로 특수건강검진과 사업장의 작업환경측정이 실시되고 있는 것으로 추정되나, 소각장에서 발생할 수 있는 여러 중금속, 다이옥신 등을 포함한 유해인자에 대한 평가는 지역주민의 건강영향평가보다 오히려 적은 항목으로 시행되고 있고, 역학적 근거 자료가 부족한 것이 현실이다. 한국환경공단의 2019년 통계자료³⁾에 따르면, 전국 소각시설의 시설관리 인력으로 등록되어 있는 인원은 3,998명으로 되어 있으나, 관련 협력업체와 재활용 분류, 음식물 쓰레기 처리 관련 인원까지 합치면 그 수는 약 1만 여명으로 추정된다. 산업폐기물, 지정폐기물 처리업체의 수와 근무인력을 추산하면 10만 여명으로 추정된다고 보고되고 있다.⁴⁾ 이들 근로자

3) 한국환경공단, 전국폐기물 발생 및 처리현황(생활, 사업장일반) 2019년

4) Kim, Ki Woong et al. (2014) "산업폐기물 소각장의 바닥재와 비산재에서 PCDDs와 DFs 농

에 대한 건강영향 평가도 지역주민들의 건강영향 평가에 맞추어 관리되어야 할 필요성이 제기된다.

2) 연구의 필요성 및 목적

국내 과거 연구에서, 김기웅 등⁵⁾⁶⁾이 중, 소규모 산업폐기물 소각장에서 발생한 비산재와 바닥재를 분석한 연구에서는 납, 카드뮴, 다이옥신류(polychlorinated dibenzo-p-dioxins, 이하 PCDD)에 대한 정성적, 정량적 측정을 하였고, TLV-TWA와 BEI 노출기준 미만으로 확인되었다. 그러나 혈중 PCDD/PCDF/PCBs의 경우 대조군보다 소각 사업장 근로자에서 높은 측정치를 보였고, 소각로 주위와 현장관리 작업자에서 높게 나타나, 소각장으로부터의 노출 가능성을 시사하였다. 그러나 건강영향을 평가한 결과에서는 성호르몬, 면역기능, 신경행동 등의 건강영향은 유의하지 않은 차이를 보였다.

구정완 등⁷⁾의 연구에서 전국의 20개 소각장에 대해 중금속, PAH, 다이옥신에 대해 작업환경측정과 255명의 근로자를 대상으로 건강진단을 실시한 결과 노출수준을 초과한 사업장은 없었으나, 일부 사업장에서 벤젠, 낮은 수준의 다이옥신 노출이 확인되었고, 21개소 중 10개 사업소에서는 작업환경측정, 특수건강진단을 실시조차 하지 않는 것으로 조사되었다.

이후 후속연구가 진행되지 않았고, 일부 소각시설은 사용년한이 증가하면서 대정비를 거치는 등 시설의 공학적, 기능적 상황에 따라 유해인자의 노출이 달라졌을 가능성이 있다. 따라서 소각장 근로자들의 노출 수준, 작업환경측정과 특수건강진단의 실시 현황, 근로자들의 객관적, 주관적 인식도, 건강수준 등에 대한 연구의 필요성이 제기된다. 이를 통해 소

도,” 분석과학. 한국분석과학회, 27(6), pp. 347-351. doi: 10.5806/AST.2014.27.6.347.

5) 김기웅 등, 산업폐기물 소각로 근로자의 건강장해 평가 연구(I), 산업안전보건연구원(2002)

6) 김기웅 등, 산업폐기물 소각로 근로자의 건강장해 평가 연구(II), 산업안전보건연구원(2004)

7) 구정완 등, 산업폐기물 소각장 근로자의 건강상태와 직업적 요인의 관련성 연구, 산업안전보건연구원(2007)

각시설에서 노출되는 유해인자의 정량적, 정성적 분석과 그에 따른 건강 영향을 분석하여 현 노출실태를 파악할 수 있을 것이다. 이를 활용하여, 향후 발생할 수 있는 소각시설 근로자들의 건강 문제, 업무상 질병을 예방하는 기초자료로 활용하는 한편, 인근 지역주민들의 건강수준과 비교할 수 있는 대조군의 역할로도 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 연구목표

본 연구에서는 소각장에 종사하는 근로자를 대상으로 이들이 근무하는 작업장의 유해인자와 건강영향, 노출실태를 파악하고자 한다. 이를 통해 소각장 근무자의 직업병 발생을 예방하기 위한 기초자료를 구축하고 예방을 위해 활용하고자 한다.

1) 국내 소각장 현황 및 소각장 관련 연구 문헌고찰

- 국내 소각시설 일반현황, 종사자 관련 일반사항

2) 소각장 유해인자와 노출 수준 평가

- 작업환경측정을 통한 소각장의 유해인자에 대한 평가
- 소각장 내 주요 지점별 분진, 중금속, PAHs, 다이옥신
- 기 실시된 작업환경 측정 결과와 항목, 정량적 분석 비교
- 소각장 근로자의 생체시료 분석을 통한 노출 수준 평가
- 요증 PAHs 대사산물, 중금속, 8-OHdG, 프탈레이트 분석
- 다이옥신 측정이 높게 나온 소각장의 근로자 일부를 대상으로 혈중 다이옥신 농도를 평가
- 일반인구 집단과 비교

3) 설문조사를 통한 소각장 근로자의 근로환경, 인식도 평가

- 조사대상 근로자의 일반적 특성과 근로환경 인식도 조사
- 일반적 건강수준, 우울정도의 평가
- 직력, 경력에 따른 노출수준의 기초자료로 활용

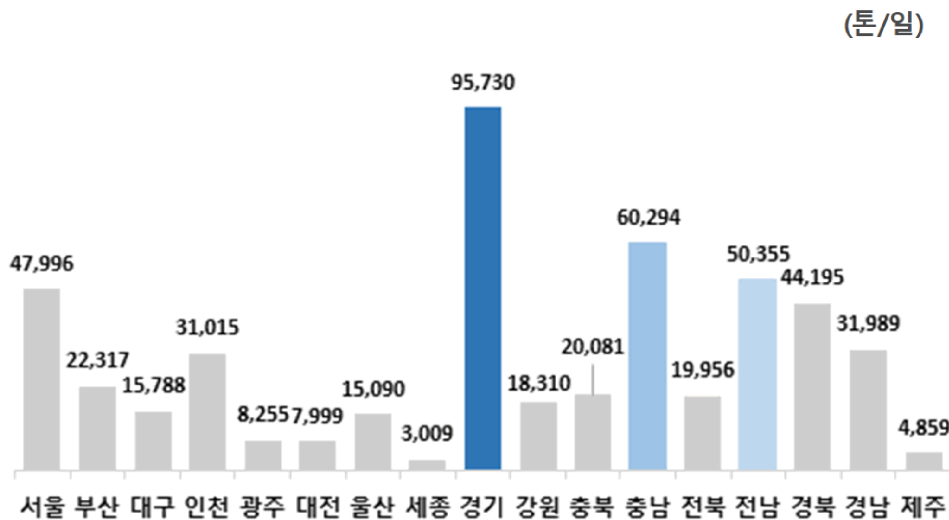
Ⅱ. 연구방법

.....

Ⅱ. 연구방법

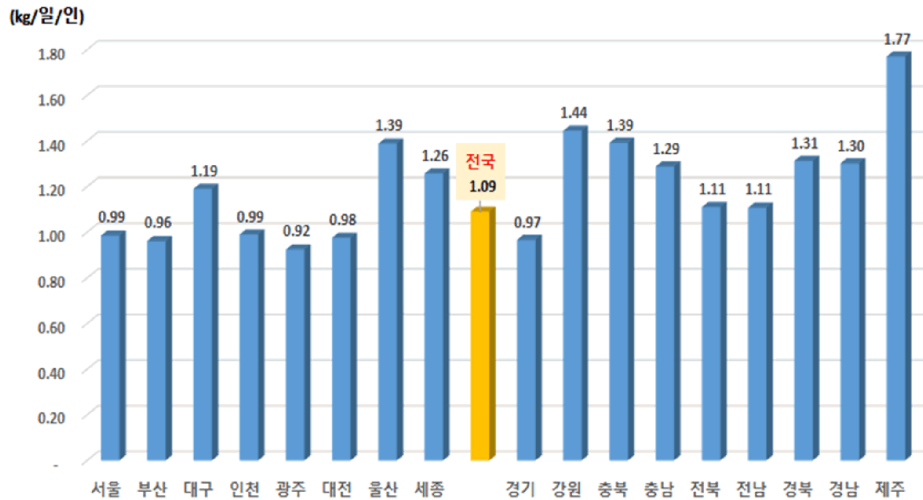
1. 국내 소각시설 일반현황⁸⁾

우리나라의 지역별로 폐기물 발생량을 살펴보면, 경기(19.3%), 충남(12.1%), 전남(10.1%) 순으로 보고되고 있다. 이는 전체 폐기물에 대한 통계자료로서, 생활폐기물로 국한해서 보면 우리나라 국민 1인당 발생하는 폐기물의 하루 발생량은 1.09kg로 조사되었는데, 2013년 0.94kg에서 꾸준히 증가하는 추세 있다. 또한, 이를 지역별로 살펴보면 제주가 1.77kg로 가장 많으며, 강원 1.44kg로 그 뒤를 이었다.



[그림 Ⅱ-1] 지역별 폐기물 발생량 비교

8) 환경부, 한국환경공단, 전국 폐기물 발생 및 처리 현황(2019년도), 2020



[그림 II-2] 지역별 1인당 하루 생활폐기물 발생량 비교

이처럼 생활폐기물의 발생량이 늘어가는 가운데, 각 지자체에서 각 행정구역에서 나온 폐기물은 원칙적으로 해당 지역에서 처리하는 것을 표방하여 각 행정구역별로 소각시설이 다양한 규모로 설립되어 있다. 2019년도 전국 폐기물 처리업체 현황에서 생활폐기물을 주로 소각하는 폐기물 공공소각시설 현황을 살펴보면 전남 53개소, 경기 27개소, 서울 5개소, 부산 2개소, 대구 1개소 등 전국 180개소의 소각시설이 신고 되어있고 지정폐기물의 소각시설은 전국 21개소가 운영되고 있다.

이들의 운영방식을 살펴보면 소각방식에 따라 일반소각 158개소, 고온용융 6개소, 열분해시설 13개소로 조사되었다. 소각로에 폐기물이 투입되어 소각하는 방식에 따라 연속식이 138개소, 회분식이 40개소, 준연속식이 9개소로 나타났다. 국내의 소각장들은 대부분 화격자 위에서 폐기물을 연소하는 스토키 방식인데 최근들어 열분해용융 소각로로 전환되고 있는 추세이다.

2. 조사 대상 소각시설과 측정지점

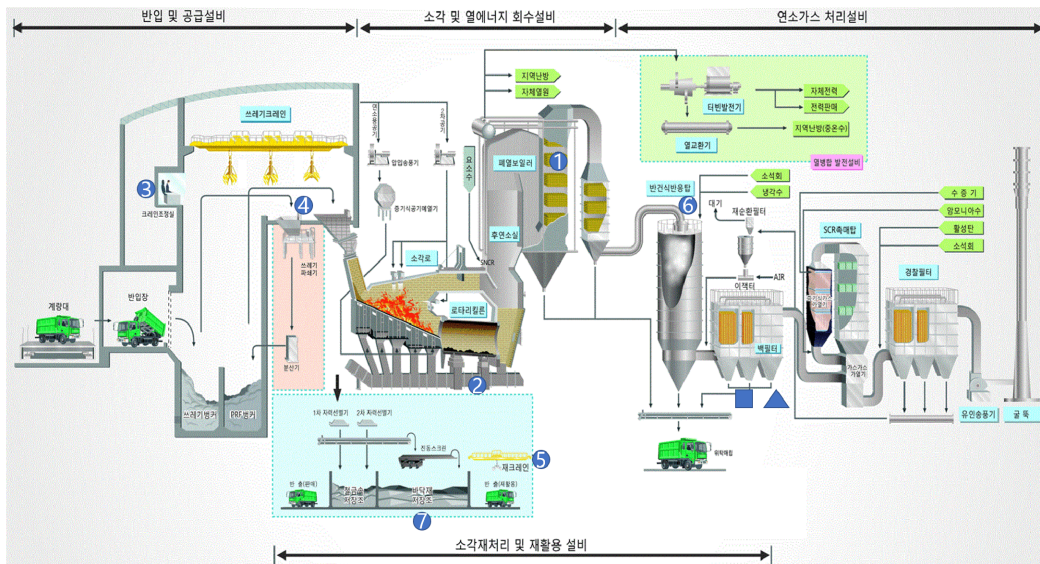
조사대상 소각시설은 연구진과 소각장 근로자 대표와 사전회의를 거쳐 국내 소각시설에서 가장 많이 사용하는 스토커방식의 소각장을 대상으로 선정하였다. 전국 일 100톤 이상 소각시설을 운영 중인 지자체 47개소 중 39개소(82%)가 스토커 방식을, 4개소가 열분해 방식을 운영 중인데, 100톤 이상 처리가 가능한 소각시설을 신규 도입하는 소각시설에서도 여전히 스토커방식이 가장 많다. 2007년 연구 당시 조사가 진행되지 않은 소각장 중 대형소각시설 2개소, 소형소각시설 1개소의 소각장을 선정하여 조사를 진행하였다. 작업환경측정 지점은 작업환경측정기관의 산업위생기술사, 근로자 대표와 함께, 과거 작업환경측정 결과를 고려하여, 소각장별로 다이옥신 1개 지점, PAH 2개 지점, 총분진, 중금속, 유기용제는 각 4개 지점을 선정하여 조사를 진행하였다.

<표 II-1> 소각장별 각 작업환경 측정인자의 측정지점

작업환경 측정인자	측정지점			비고
	A소각장	B소각장	C소각장	
다이옥신	소각로 상부	투입호퍼	소각로 상부	1개 지점
PAH	소각로 상부 바닥재 집결지	투입호퍼 바닥재 집결지	소각로 상부 바닥재 집결지	2개 지점
총분진	소각로 상부 바닥재 집결지	투입호퍼 제어실	소각로 상부 투입호퍼	4개 지점
중금속	소각로 하부	소각로 상부	반건식 반응탑 상부	
유기용제	재크레인실 내부	바닥재 집결지	재추출기	

조사지점 선정은 과거 작업환경 측정자료, 소각장 근로자의 직무, 동선, 체류시간 등을 고려하고, 현장 근로자의 진술과 산업위생기사 2인의 의견을 토대로 대표성이 있는 곳으로 선정하였다.

선정된 주요 측정 지점과 설명, 근로자의 작업내용, 체류시간은 [그림 II-3]과 같다.



번호	측정지점	설명	출입빈도
①	소각로 상부	소각로에서 소각을 거친 폐열이 후연소를 거친 후 폐열을 이용한 보일러 시설을 거치는 곳	정상 작동을 위한 확인, 점검 및 정비, 보수를 위해 매시간 순회, 상시 출입하며, 정비, 보수가 필요한 경우 1-2시간 가량 머무르며 작업
②	바닥재 집결지 (재추출기)	소각되고 남은 재가 하부에 쌓여서 저장조로 이동하거나 지정폐기물 처리를 위해 포장되는 곳	바닥재의 포집상태를 확인하고 유지를 위해 상시 출입

③	크레인 조정실 (제어실)	폐기물이 저장된 피트에서 호퍼에 투입하는 크레인을 조정을 하는 작업 공간 (소각로의 가동 상태, CCTV 등의 모니터링을 하는 운영 본부)	근로자들이 항상 상주하며 상시 작업
④	투입 호퍼	소각될 폐기물이 소각로로 들어가는 투입구	투입부가 막히거나 문제가 발생할 경우 정기 점검을 위 해 출입
⑤	재크레인 조정실	소각하고 남은 재를 외부에 지정폐기물로 반출하기 위해 저장조에서 옮기는 크레인을 조정하는 곳	바닥재의 저장 상태에 따라 상시 또는, 주 3-4회 운영
⑥	반건식 반응탑 상부	소각 후 외부에 배출되는 연 기에 소석회를 투입하여 산 성가스를 제거하고, 응축 및 흡착에 의해 중금속을 1차 제거하는 설비	소석회 투입 및 정비를 위해 상시 출입, 소석회 투입이나, 정비가 필요한 경우 30분-2 시간 근무
⑦	바닥재 저장조	소각 후 남은 재에서 철금속 을 자기력으로 제거하는 작 업 후에 외부 지정폐기물로 반출하기 위해 저장하는 곳	바닥재의 저장 상태에 따라 상시 또는, 1주 3-4회 운영

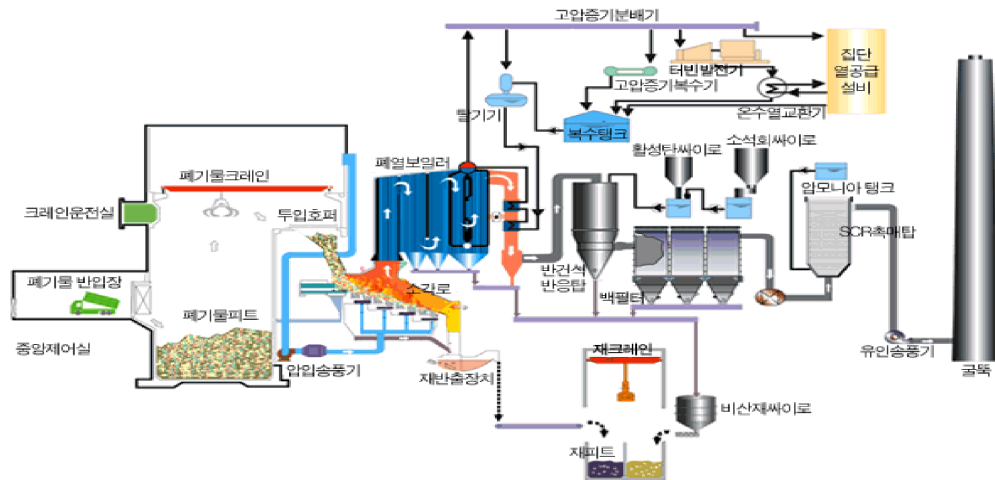
[그림 II-3] 소각장의 모식도와 주요 측정 지점

측정지점은 각 소각장의 특성을 고려하여 조정하였고, 각 소각장의 비교를 위해 최대한 동일한 기능을 담당하는 부서, 위치에서 각 인자별 측정을 실시하였다. 각 소각장에서 실시한 기존의 작업환경측정은 개인시료 측정 위주로 진행을 하였는데, 다이옥신과 PAH의 경우 고용량 공기시료채취기(High volume air sampler)를 사용하므로 개인시료 측정이 불가하였다. 이번 연구에서는 소각장의 각 지점별 노출현황과 상태를 중심으

로 보기 위해 작업환경측정은 모두 지역시료채취 방식으로 진행하였다.

1) A 소각장

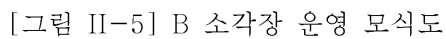
1996년 가동을 시작한 소각시설로, 소각로 2기에서 하루 최대 400톤의 처리용량을 갖춘 대규모 소각시설이다. 소각방식은 스토커방식으로 근무 기술인력은 45명이다.



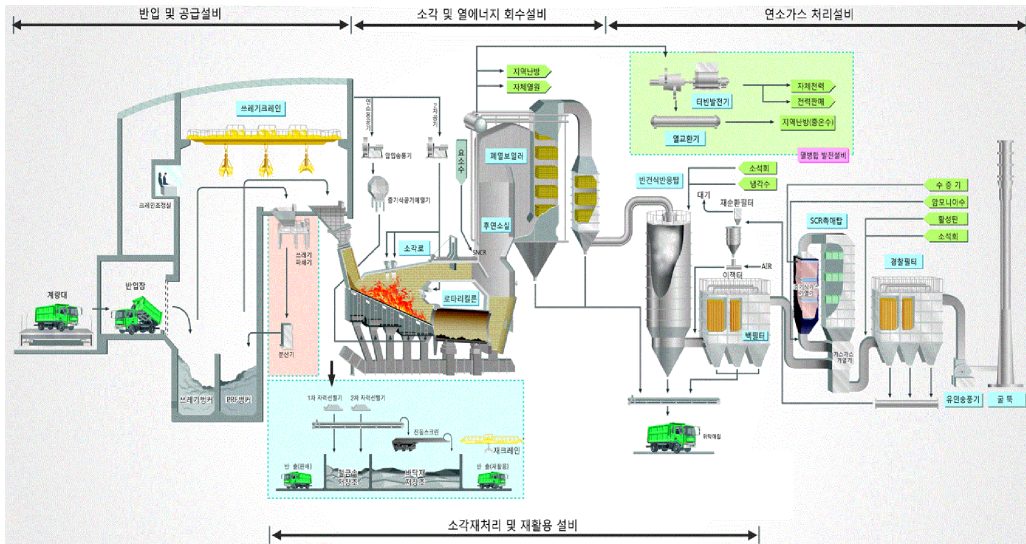
[그림 II-4] A 소각장 운영 모식도

2) B 소각장

2003년 가동을 시작한 소각시설로, 소각로 2기에서 하루 42톤의 처리용량을 갖춘 소규모 소각시설이다. 소각방식은 연속연소식 스토커방식으로 재활용 선별장도 갖추고 있다. 근무 인력은 25명이다.



2005년 가동을 시작한 소각시설로, 소각로 3기에서 하루 최대 750톤의 처리용량을 갖춘 대규모 소각시설이다. 소각방식은 스토크방식으로 근무 기술인력은 54명이다. 폐열을 이용해 보일러, 증기터빈을 가동하여 전기의 생산과 중온수를 공급하는 부가 시설도 갖추고 있다.



[그림 II-6] C 소각장 운영 모식도

4) 소각로의 운영방식

본 연구의 대상 소각장 규모와 소각로의 갯수의 차이는 있으나 모두 스토커(Stoker) 방식의 소각로를 운영하고 있었다. 스토커 방식은 앞의 모식도에서처럼 호퍼에 크레인을 이용하여 소각할 폐기물을 집어넣으면 투입된 폐기물은 경사가 있는 화격자(Stoker)위에 놓여져 흘러내리면서 연소가 되게 되는데, 대용량으로 처리가 가능한 장점이 있어 국내에서 가장 많이 건설된 방식이다. 소각이 이루어지는 과정은 폐기물 입고, 반입, 투입, 소각, 보일러, 집진, 배출의 과정을 거치며 소각 후 남은 바닥재는 지정폐기물로 매립을 위해 외부로 반출된다.

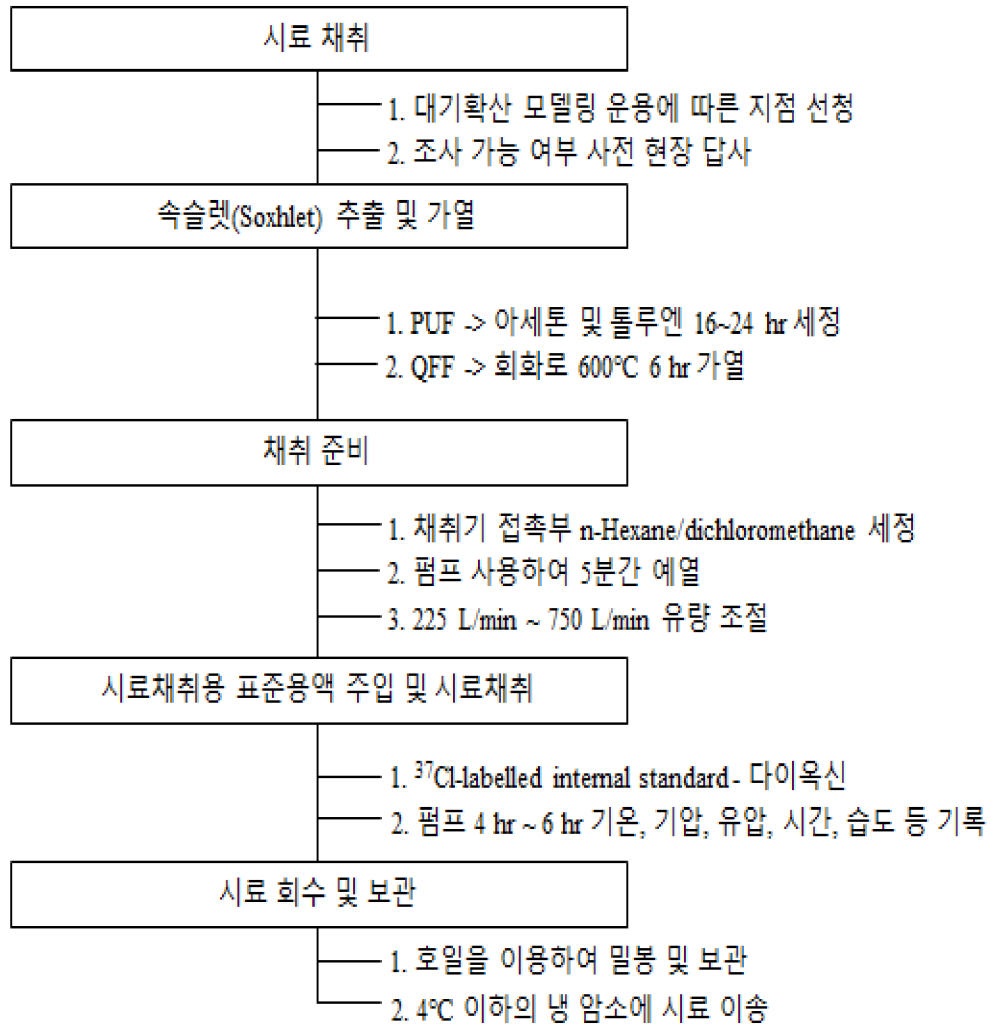
폐기물은 약 800-900℃의 연소실로 들어가 연소되게 되고, 연소된 소각재는 소결작용을 거쳐 중금속 용출이 억제되는 물질로 변환된다. 스토커 방식의 소각로는 고속, 고효율의 공기 순환을 이용해 연소 효율을 높이도록 설계된 소각로로, 고체 형태의 폐기물을 별도의 파쇄과정 없이 연속적으로 소각, 배출하는데 적합한 방식이다.

고온으로 장기간 운영하게 되면 소각로의 마모, 노후화가 있을 수 있으며 연소 중에 클링커(Clinker)라는 소파가 발생할 수 있다. 일정기간 가동 후 대정비 등의 보수공정이 별도로 필요하다.

2. 분석방법

1) 다이옥신(PCDDs/PCDFs)

다이옥신 측정은 국립환경과학원에서 POPs(Persistent Organic Pollutants) 측정 인정기관, 국제공인시험기관(기술표준원) 다이옥신 측정 인정기관으로 지정된 외부 기관에 의뢰하였다. 해당 기관에서는 「잔류성유기오염물질 공정시험기준」에 따라 ‘ES 10902.1 환경대기 시료 중 비의도적 잔류성유기오염물질(UPOP)s 동시시험기준-HRGC/HRMS’의 세부 시험법에 따라 진행되었다.

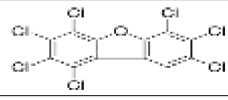
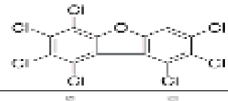
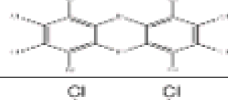
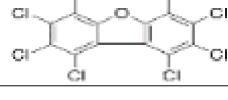


[그림 II-7] 환경대기 중 다이옥신류 및 PAHs 시료 채취방법

분석한 이성체의 수는 총 17종으로 PCDDs가 7 종이며, PCDFs가 10 종에 해당하고 있다. <표 II-2>에 물질에 대한 정보를 표시하였다.

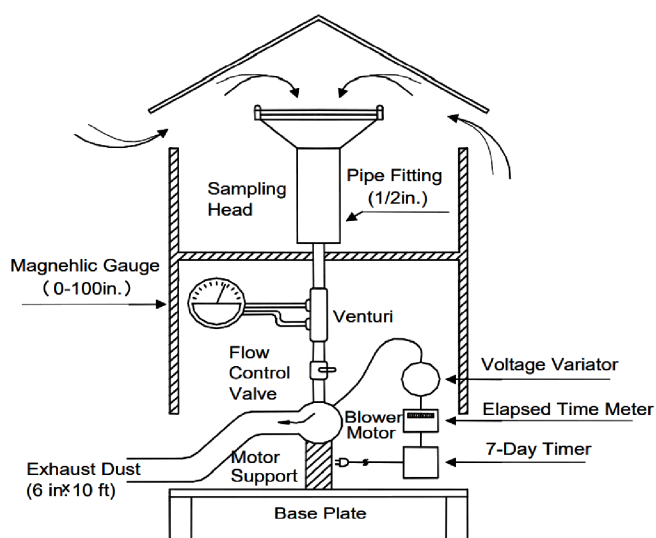
<표 II-2> 다이옥신류 물질정보

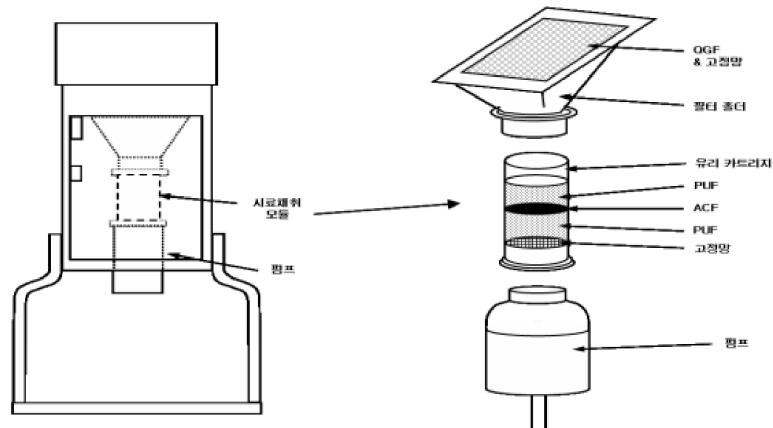
물질명	화학식	CAS-No.	M.W.	화학구조
2,3,7,8-TeCDD	$C_{12}H_4Cl_4O_2$	1746-01-6	321.9	
2,3,7,8-TeCDF	$C_{12}H_4Cl_4O$	51207-31-9	305.9	
1,2,3,7,8-PeCDD	$C_{12}H_3Cl_5O_2$	40321-76-4	356.4	
1,2,3,7,8-PeCDF	$C_{12}H_3Cl_5O$	57117-41-6	340.4	
2,3,4,7,8-PeCDF	$C_{12}H_3Cl_5O$	57117-31-4	340.4	
1,2,3,4,7,8-HxCDD	$C_{12}H_2Cl_6O_2$	39227-28-6	390.9	
1,2,3,6,7,8-HxCDD	$C_{12}H_2Cl_6O_2$	57653-85-7	390.9	
1,2,3,7,8,9-HxCDD	$C_{12}H_2Cl_6O_2$	19408-74-3	390.9	
1,2,3,4,7,8-HxCDF	$C_{12}H_2Cl_6O$	70648-26-9	374.9	
1,2,3,6,7,8-HxCDF	$C_{12}H_2Cl_6O$	57117-44-9	374.9	
1,2,3,7,8,9-HxCDF	$C_{12}H_2Cl_6O$	72918-21-9	374.9	
2,3,4,6,7,8-HxCDF	$C_{12}H_2Cl_6O$	60851-34-5	374.9	
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	$C_{12}HCl_7O_2$	35822-46-9	425.3	

1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	$C_{12}HCl_7O$	67562-39-4	409.3	
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	$C_{12}HCl_7O$	67562-39-4	409.3	
1,2,3,4,6,7,8,9-OCDD	$C_{12}Cl_8O_2$	3268-87-9	459.7	
1,2,3,4,6,7,8,9-OCDF	$C_{12}Cl_8O$	39001-02-0	443.7	

(1) 대기중 다이옥신 분석

고용량 공기시료채취기(High volume air sampler)를 사용하여 시료채취를 진행하였다. 고용량 공기시료채취기는 입자상 물질과 기체상 물질을 동시에 채취할 수 있도록 여과지 장착이 가능한 입자상 채취부, 기체상물질의 채취가 가능하도록 하는 흡착제의 장착부, 펌프, 유량계 또는 유량 측정부, 주요 장치를 비, 바람 등에 의한 여과지 파손을 보호할 수 있는 셸터로 구성되어있으며, 장비의 구성은 [그림 II-8]에 나타냈다.





[그림 II-8] High volume air sampler의 모식도

측정위치는 소각시설의 운영 중 정비보수, 시설점검을 위해 근로들이 상시 출입하는 지역 중, 출입, 이동이 가장 잦으면서 노출의 가능성이 높은 지역을 선정하였다. 근로자들은 기본적으로 소각로 내부시설의 점검, 정상 작동 확인을 위해 정기적으로 상시 출입을 하는데, 건물 5층 높이의 소각로의 점검을 위해서는 소각로 상부에서 시작하여 아래로 내려가는 방식으로 순회, 점검을 하였다. 따라서 소각로 상부는 근로자들이 소각시설 내부로 출입하기 위해서는 항상 지나치는 곳이며, 소각이 된 가스가 포집이 되어 배출을 위한 필터링을 거치는 시작점이라 할 수 있다. 측정을 위한 장치는 주위에 장애물이 없고 오염원을 대표할 수 있는 곳에서 24시간 동안 포집하였다.



[그림 II-9] 고용량 공기시료채취기를 이용한 다이옥신과 다환방향족탄화수소 측정(소각로 상부)

분석 일반사항으로 환경대기를 매질로 약 1000Sm^3 의 시료량으로 희석배수 ‘2’, 최종 농축량은 $10\mu\text{l}$, 기기주입량은 $1\mu\text{l}$ 로 분석하였다. 다이옥신 분석을 위한 전처리, GC, MS 분석조건은 <표 II-3>과 같다.

<표 II-3> 다이옥신류 분석정보

구분	추출용매	추출시간	비고
고형물	톨루엔	24시간/회	Soxhlet
황산처리	진한 황산	20 mL/회	색깔이 엷어질때까지
세척	헥산세정수	200 mL/회	n-Hexane 30mL
농축	0.05mL		

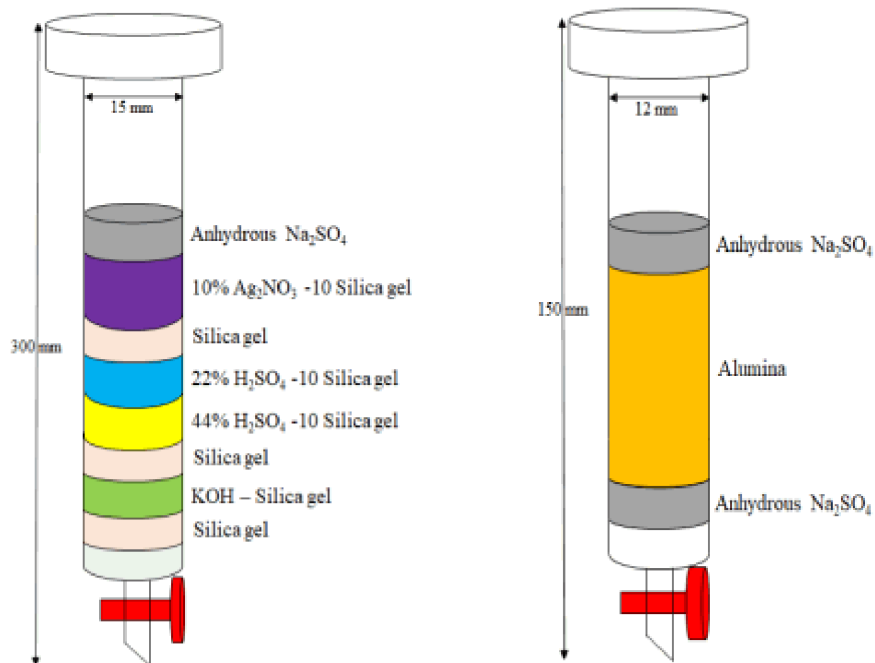
－ 추출단계: 폴리우레탄폼 및 활성탄 펠트, 석영섬유필터를 유리재 여과조에 삽입하여 디클로로메탄 500 mL로 24시간 속슬렛 추출하였다. 추출 시료에 정제용표준물질(EPA-1613LCS)을 첨가 후 무수황산나트륨으로 탈수하고, hexane으로 용매 전환 후 1 mL까지 농축하였다. 이 추출액을 정제용 시료로 사용하였다.

- 황산처리: 분별깔때기에 추출단계에서 얻은 추출액에 n-Hexane 으로 세정한 증류수 50mL를 넣어 수세한 후 황산 25 mL로 방해물질을 제거하여 추출용매인 Hexane층이 맑아질 때까지 약 2회 진행하였다. Hexane층이 맑아지면 n-Hexane으로 세정한 증류수 50 mL와 NaCl 5 g 을 넣어 수세한 후 무수황산나트륨을 이용해 수분을 제거하고 플라스크에 Hexane만 취하였다.

- 정제단계: 수분을 제거한 시료를 회전증발농축기로 약 5 mL까지 농축하여 정제용 컬럼에 주입하였다. 다층실리카겔 컬럼은 용매로 세정한 안지름 15 mm, 길이 300 mm 유리 컬럼에 활성 실리카겔 1 g, 염기성 실리카겔 3 g, 활성 실리카겔 1 g, 44% 산성 실리카겔 4.5 g, 22% 산성 실리카겔 6 g, 활성 실리카겔 1 g, 10% 질산은 실리카겔 3 g, 무수황산나트륨 6 g 을 순차적으로 충전한 후 Hexane으로 세정하였다. 이후 상부에 농축된 시료 주입한 후 Hexane 150 mL로 매초 1방울 속도로 용출하였다. 용출된 시료는 회전증발농축기와 질소농축기를 이용해 약 1 mL까지 농축하여 알루미나 컬럼에 주입하였다[그림II-10].

용매로 세정한 안지름 12 mm, 길이 150 mm 유리 컬럼에 무수황산나트륨 2 g, 활성 알루미나 6 g, 무수황산나트륨 2 g 을 순차적으로 충전한 후 Hexane으로 세정하였다. 농축된 시료를 주입한 후 2% Dichloromethane 함유 Hexane 100 mL로 매초 1방울 속도로 용출하여 이 용출액은 폐기하고, 이어서 50% Dichloromethane 함유 Hexane 150 mL로 1방울/초의 속도로 용출하여 용출액으로 사용하였다.

용출액은 회전증발농축기와 질소농축기를 이용해 약 100 μ L로 농축한 후, Toluene 0.5 mL를 넣어 용매를 전환하였다. Toluene으로 전환한 시료는 질소농축기를 이용해 완전히 농축시키고, 실린지 첨가용 내부표준물질(EPA-1613ISS, 20 ng/mL) 50 μ L를 정확히 취하여 주입한 후 기기분석용 시료로 사용하였다.



[그림 II-10] 다층실리카겔 컬럼과 알루미나 컬럼

<표 II-4> Column Chromatography 조건

구분	용매/부피	사용량	비고
다층실리카겔 크로마토그래피	n-Hexane/150 mL	130 ℃, 18hrs (Activated)	30 cm X 2.5 cm
염기성 알루미나 크로마토그래피	2 % DCM in Hexane/100mL	130 ℃, 18hrs (Activated) 10g사용	GC/ECD check후 폐기
	n-Hexane+ DCM(1:1)/150mL		30 cm X 1.0 cm 최종시료량 0.05mL

- 기기분석: 기기분석은 기체크로마토그래프/고분해능 질량분석계의 전자충격 이온화 방식으로 진행하였으며, 정성분석은 각 동족체의 2개 이온을 선택이온검출법(SIM, selective ion monitoring)과 선택이온의 머무름 시간으로 하고 정량분석은 선택이온의 면적비를 계산한 상대감응계수(RRF, relative response factor)법으로 하였다. 오븐의 온도 조건은 화합물의 분리와 감도가 최적화되도록 160℃에서 시작하여 310℃까지 점차적으로 열을 가하여 60분간 진행하였다. 주입구 온도는 290℃, 운반기체는 헬륨을 사용하였고, 고분해능 질량분석기의 이온소스 및 연결부 온도는 290℃로 설정하였다. 고분해능 질량분석기는 분해능 10,000 이상으로 질량 조정(mass tuning)을 한 다음 마그네트 전환방식(Magnet switching)으로 PFK(Perfluorokerosene)에 대한 질량검정을 하였다. 각 그룹마다 잠금질량(Lock mass)을 설정하고, PFK 질량검정결과는 PFK의 이론값과 실측값의 차가 5 ppm 이하를 만족하도록 하였으며 이 범위를 만족하지 못했을 경우에는 재조정하였다.

<표 II-5> GC 분석 조건(VF-Xms)

구 분	내 용
Instrument	Agilent 6890 Series
Column	VF-Xms(60 mX0.32 mm ID 0.25 µm)
Oven Temp.	160 °C, 1min hold 35°C/min to 230°C,15min hold 10°C/min to 250°C,22min hold 15°C/min to 280°C,16min hold
Injection mode	Splitless
Injector Temp.	280 °C
Purge Off Time	1min
기타사항	Carrier gas: constant flow 33psi

<표 II-6> GC 분석 조건(DB-DIOXIN)

구 분	내 용
Instrument	Agilent 6890 Series
Column	DB-DIOXIN(60 mX0.25 mm ID 0.25 μm)
Oven Temp.	180 °C, 1min hold, 10 °C/min to 250 °C, 10min hold 2.5°C/min to 270°C, 34min hold
Injection mode	Splitless
Injector Temp.	250 °C
Purge Off Time	1min
기타사항	Carrier gas: constant flow 37psi

<표 II-7> MS 분석 조건(VF-Xms)

구 분	내 용
Instrument	Jeol-800D MStation
Ionizing mode	EI/SIM
Source Temp.	280 °C
Interface Temp.	280 °C
Electron Energy	38 eV
기타사항	Mass calibration material: perfluorokerosene-H Type of analyzer: Magnetic/Electric sector Type of ionization: EI positive Switching time: 50 ms(Magnet switching) Resolution: >10,000

<표 II-8> MS 분석 조건(DB-DIOXIN)

구 분	내 용
Instrument	Agilent 6890 Series
Column	DB-DIOXIN(60 mX0.25 mm ID 0.25 μm)
Oven Temp.	180 °C, 1min hold, 10 °C/min to 250 °C, 10min hold 2.5°C/min to 270°C, 34min hold
Injection mode	Splitless
Injector Temp.	250 °C
Purge Off Time	1min
기타사항	Carrier gas: constant flow 37psi

<표 II-9> 내부표준물질 종류 및 첨가량

구분 Cat. No	첨가 시점	다이옥신류(PCDDs)		퓨란류(PCDFs)		계
		화학명	첨가 량 (ng)	화학명	첨가 량 (ng)	
시료채취용 EPA1613CSS	시료 채취전	³⁷ Cl-2,3,7,8-TCDD	1	-	-	1종
정제용 EPA1613LCS	추출 전	¹³ C ₁₂ -2,3,7,8-TCDD	1	¹³ C ₁₂ -2,3,7,8-TCDF	1	15종
		¹³ C ₁₂ -1,2,3,7,8-PeCDD	1	¹³ C ₁₂ -1,2,3,7,8-PeCDF	1	
		¹³ C ₁₂ -1,2,3,4,7,8-HxCDD	1	¹³ C ₁₂ -2,3,4,7,8-PeCDF	1	
		¹³ C ₁₂ -1,2,3,6,7,8-HxCDD	1	¹³ C ₁₂ -1,2,3,4,7,8-HxCDF	1	
		¹³ C ₁₂ -1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	1	¹³ C ₁₂ -1,2,3,6,7,8-HxCDF	1	
		¹³ C ₁₂ -OCDD	2	¹³ C ₁₂ -1,2,3,7,8,9-HxCDF	1	
				¹³ C ₁₂ -2,3,4,6,7,8-HxCDF	1	
				¹³ C ₁₂ -1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	1	
		¹³ C ₁₂ -1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	1			
실린지 첨가용 EPA1613ISS	HRGC/ HRMS 분석전	¹³ C ₁₂ -1,2,3,4-TCDD	0.5	-	-	2종
		¹³ C ₁₂ -1,2,3,7,8,9-HxCDD	0.5			
소계		9종		9종		18종

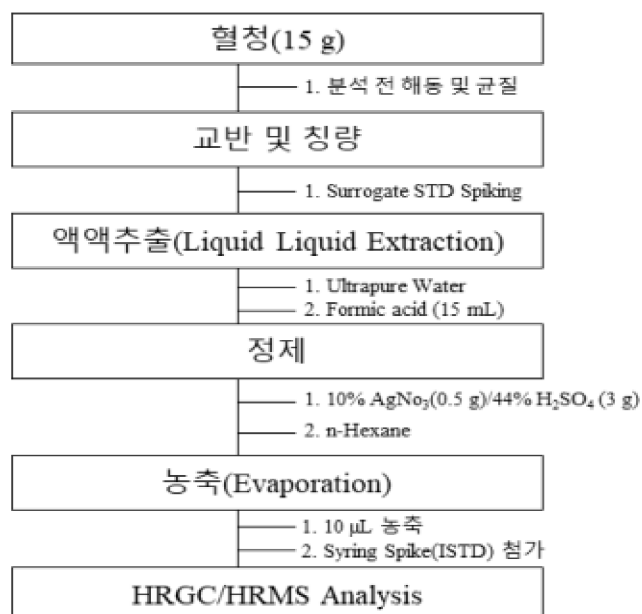
(2) 혈중 다이옥신 분석

－ 시료 채취: 혈중 다이옥신의 분석은 혈청으로 약 20ml이 필요하므로 전혈의 채혈을 50ml로 준비하였다. 혈중 다이옥신 채혈 연구 참여자 1명당 Serum separating tube에 약 5ml씩 총 10개에 나누어 채혈을 하였고, 채혈 후 30분 이내에 원심분리기로 분리하였다.

－ 추출단계: 혈청은 15g으로 하여 액액추출법(LLE)를 적용해 Ultrapure Water 및 Formic acid 15mL를 사용하여 지질, 콜레스테롤 등 방해성분을 제거하였다.

－ 정제단계: 10% 질산은 실리카겔 0.5g과 44% 황산 실리카겔을 이용하여 다층컬럼을 제작 후 추출과정에서 얻은 추출액을 다층컬럼 상부에 부하하여 정제하였다.

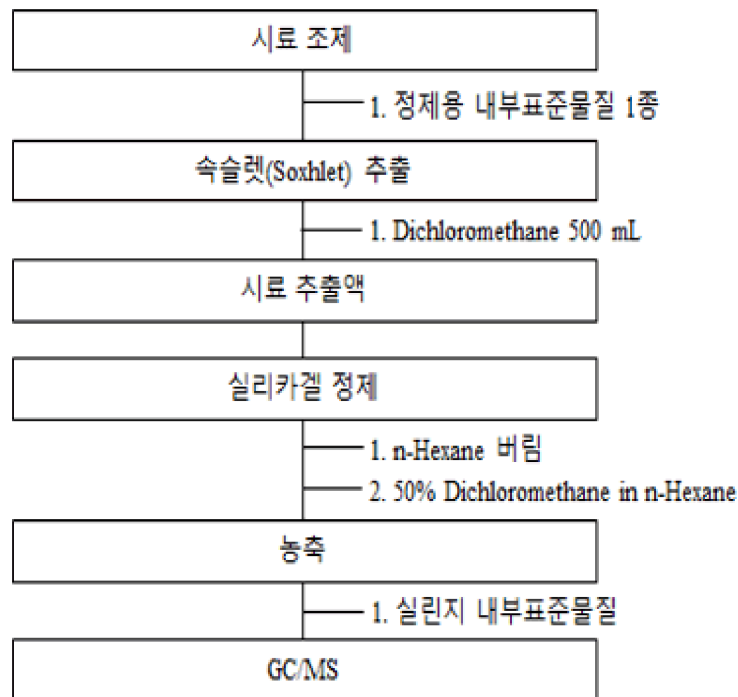
－ 기기분석: 기기분석은 환경대기 중 다이옥신류와 동일하게 진행하였다.



[그림 II-11] 혈액 중 다이옥신류 분석 방법 모식도

2) 다환방향족탄화수소(Polyaromatic Hydrocarbons, PAHs)

PAHs는 벤젠고리가 2개 이상으로 구성된 유기화합물을 총칭하며, 다양한 환경매체에서 검출되는 대표적인 유해화학물질로 알려져 있다. 주요 발생원은 화석연료를 연소하는 과정에서 발생하며, 아스팔트 제조 및 담배연기 등의 불완전한 연소가 발생할 시 생성되어 환경 중에 배출된다. 본 연구에서는 Naphthalene을 포함한 총 16종의 물질을 분석하였으며, 대상 물질에 대한 화학식 및 분자량 등에 대한 자세한 정보는 <표 II-9>에 나타내었다. 「대기오염물질 공정시험기준」 ES 01802.1 환경 대기 중 다환방향족탄화수소류 기체크로마토그래피/질량분석법에 따라 분석을 진행하였다.



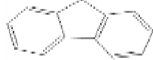
[그림 II-12] PAHs 분석 방법 모식도

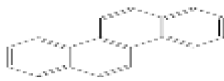
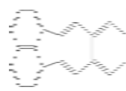
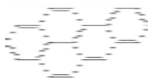
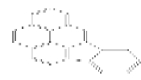
- 추출단계: 폴리우레탄폼 및 활성탄 펠트, 석영섬유필터를 유리재 여과조에 삽입하여 디클로로메탄 500mL로 16시간 동안 속슬렛 추출하였으며, 추출 시 정제용 표준물질을 일정량 주입하여 함께 추출하였다. 추출이 완료되면 무수황산나트륨으로 탈수하고, hexane으로 용매 전환 후 1mL까지 농축하였다. 이 추출액을 정제용 시료로 사용하였다.

- 농축 및 정제단계: 내경 1cm, 길이 30cm의 정제용 컬럼에 활성화된 실리카겔 5g을 충전하고 그 위에 무수황산나트륨을 약 1g을 충전한 컬럼을 사용하였다. 첫 번째 용출로서는 헥산 일정량을 이용하여 방해물질을 제거하고, 두 번째 용출로서 50% 디클로로메탄이 함유된 헥산 용액으로 용출하였다. 용출액은 회전농축하여 0.05 ~ 1mL까지 미세농축 후 실린지 첨가용 내부표준물질을 주입하여 기기분석을 실시하였다.

- 기기분석: 분석은 기체크로마토그래프/질량분석기의 전자충격 이온화방식을 사용하였고, 정성 분석은 각 동족체의 2개 이온을 선택이온검출법(SIM: Selected ion monitoring)과 선택이온 머무름시간으로 하고 정량분석은 그 선택이온의 면적비 및 내부표준물질의 농도를 계산한 상대감응계수(RRF)법으로 진행하였다.

<표 II-10> 분석대상 PAHs

물질명	화학식	CAS-No.	M.W.	화학구조
Naphthalene	C ₁₀ H ₈	91-20-3	128.2	
Acenaphthylene	C ₁₂ H ₈	208-96-8	152.2	
Acenaphthene	C ₁₂ H ₁₀	83-32-9	154.2	
Fluorene	C ₁₃ H ₁₀	86-73-7	166.2	

Phenanthrene	C ₁₄ H ₁₀	85-01-8	178.2	
Anthracene	C ₁₄ H ₁₀	120-12-7	178.2	
Fluoranthene	C ₁₆ H ₁₀	206-44-0	202.3	
Pyrene	C ₁₆ H ₁₀	129-00-0	202.3	
Benz[a]anthracene	C ₁₈ H ₁₂	56-55-3	228.3	
Chrysene	C ₁₈ H ₁₂	218-01-9	228.3	
Benzo[b]fluoranthene	C ₂₀ H ₁₂	205-99-2	252.3	
Benzo[k]fluoranthene	C ₂₀ H ₁₂	207-08-9	252.3	
Benzo[a]pyrene	C ₂₀ H ₁₂	50-32-8	252.3	
Indeno(1,2,3-cd)pyrene	C ₂₂ H ₁₂	193-39-5	276.3	
Dibenz[a,h]anthracene	C ₂₂ H ₁₄	53-70-3	278.3	
Benzo[ghi]perylene	C ₂₂ H ₁₂	191-24-2	276.3	

3) 다이옥신과 PAHs 정도관리 정도보증

본 과제에서 분석한 대상물질의 자료의 질 관리를 위해 아래와 같은 정도관리(QA/QC)를 수행하였다.

(1) 검량선의 직선성 (Linearity)

적용범위의 농도에서 분석물질의 농도에 상응하는 측정결과를 얻을 수 있는가를 확인하는 것으로 직선의 상관계수(R²)를 활용하였다. 본 과업에서 직선의 상관계수(R²)는 0.99를 기준으로 하였다.

(2) 방법검출한계(MDL, method detection limit)

분석방법검출한계는 시료와 비슷한 매질 중에서 분석대상물질을 측정할 수 있는 최소 농도로 예상되는 MDL의 2~5배 이내에서 spiking 한 후 7회 실험을 수행하여 t-value ($\alpha = 99\%$)을 3.143으로 하여 표준편차를 곱하여 구하였다.

$$MDL = t-value_{(\alpha=99)} \times S$$

$$t-value = 3.143 \text{ (7회 시험시)}$$

$$S = \text{표준편차}$$

(3) 정밀도(Precision)

시험분석 결과의 반복성을 나타내는 것으로 표준시료를 반복 시험하여 얻은 결과를 상대표준편차(RSD, relative standard deviation)로 나타내며 연속적으로 n 회 측정한 결과의 평균값($\bar{x}$)과 표준편차(s)로 계산하였다.

(4) 회수율 (Recovery)

회수율은 표준물질을 이용하여 시료를 분석한 측정값과 바탕시험의 측정값과 차이를 인증된 농도의 상대 백분율로 나타내며 그 값이 70~120 % 이내인 것을 유효한 것으로 판정하였다.

$$\%Rec = \frac{C_S - C_B}{C_{cer}} \times 100$$

C_S = 시료의 측정값

C_B = 바탕시험의 측정값

C_{cer} = 표준물질의 인증값

(5) 정확도(accuracy)

정확도란 시험분석 결과가 참값에 얼마나 근접하는가를 나타내는 것으로 동일한 매질의 인증시료를 확보할 수 있는 경우에는 표준절차서 (SOP, standard operational procedure)에 따라 인증표준물질을 분석한 결과값(CM)과 인증값(CC)과의 상대백분율로 구하였다.

인증시료를 확보할 수 없는 경우에는 해당 표준물질을 첨가하여 시료를 분석한 분석값(CAM)과 첨가하지 않은 시료의 분석값(CS)과의 차이를 첨가 농도(CA)의 상대백분율 또는 회수율로 계산하였다.

$$\text{정확도}(\%) = \frac{C_M}{C_C} \times 100 = \frac{C_{AM} - C_S}{C_A} \times 100$$

(6) 성분별 유효성 검증

본 과제를 진행하기 전 분석방법의 유효성 검증을 위해 성분마다 분석 방법검출한계(MDL)를 진행하였다. 바탕시료로는 환경시료를 사용하였다.

방법검출한계 시험을 위해 바탕시료인 환경시료 일정량을 취하고 시료 중 분석성분에 따라서 <표 II-11>과 같은 농도로 Spike하여 7회 반복시험을 진행하였다.

<표 II-11>매질별 방법검출한계 Spiking 농도

시료	분석 성분	농도
대기	다이옥신류	0.0025 ~ 0.0248 pg/Sm ³
	PAHs	0.030 pg/Sm ³

4) 중금속

여과포집법으로 mixed cellulose ester(MCE)필터를 사용하였다. 분석은 NIOSH 7300을 따라 ICP-OES(Thermo Scientific사 iCAP 7000)으로 실시하였다. 포집된 여과지를 산으로 회화시킨 다음 시료용액을 조제하여 ICP(Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer, 유도결합플라즈마분광분석기)를 이용하여 정량한다. 전처리와 분석과정은 아래의 순서에 따라 진행하였다.

1. 각 개인 시료채취펌프를 하나의 대표적인 시료채취매체로 보정한다.
2. 1~4 L/min의 유량으로 총 200~1500 L의 공기를 채취하며, 여과지에 채취된 먼지가 총 2 mg을 넘지 않도록 한다.
3. 채취가 끝난 여과지는 밀봉하여 먼지가 떨어지지 않도록 카세트를 바로 세워서 운반한다.
4. 카세트필터 홀더를 열고 시료와 공시료를 깨끗한 비이커로 옮긴다.
5. 회화용액(4:1 (V/V) HNO₃ : HClO₄) 5 mL를 넣고 시계접시를 덮은 후, 용액이 0.5 mL 남을 때까지 가열판 온도 120 °C에서 가열한다.
회화용액 2 mL를 넣고 용액이 맑아질 때까지 회화과정을 반복한다.
6. 시계접시와 비이커를 증류수로 행군다.
7. 시계접시 제거 후 가열판 온도 150 °C에서 용액 0.5 mL 정도 남을 때까지 건조한다.

8. 희석용액(4% HNO₃, 1% HClO₄) 2~3 mL로 회화물질을 용해한다.
9. 최종 부피를 10 mL가 되도록 한다.

시료의 분석은 ICP(Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer, 유도결합플라즈마분광분석기)를 이용하였다. 흡광도를 측정된 흡광도를 이용하여 그에 상응하는 시료의 금속 농도(C_s)와 공시료의 평균값(C_b)을 계산하였다. 시료의 용액 부피(V_s)와 공시료 부피(V_b)를 이용하여 채취된 공기중(V) 채취물질의 농도(C)를 계산하고, 아래식에 의하여 해당물질의 농도를 구하였다.

$$C = \frac{C_s V_s - C_b V_b}{V} (mg/m^3)$$

C_s : 시료에서의 분석물질의 농도(ug/mL)

C_b : 공시료에서의 분석물질의 농도(ug/mL)

V_s : 시료에서 희석한 최종용량(mL)

V_b : 공시료에서 희석한 최종용량(mL)

V : 공기채취량(L)

※ 회수율의 적용을 위해 위에서 구한 시료농도를 회수율로 나누어 계산하거나, 위 공식의 분모 회수율을 추가시킨다.

5) 유기용제(벤젠, 톨루엔, 크실렌)

고체포집법으로 Coconut shell charcoal 필터를 사용하였다. 분석은 GC(Gas chromatography)로 실시하였다. 분석기기는 GC-2030 (SHIMADZU) 모델로 탈착액은 이황화탄소 1ml(30분)을 이용하였다. 컬럼은 HP-1 (30m x 0.32mm x 0.25 μ m)을 사용하였다.

6) 총분진

여과포집법으로 Glass Fiber 필터를 사용하였다. Micro Balances(중량 분석법)으로 측정 전후의 무게 변화를 통해 측정하였다.

7) 요중 중금속

연구 참여 근로자의 소변은 업무 도중에 채취하였으며, 정도관리를 통과한 특수건강진단기관의 ‘생물학적 노출지표 검사 지침’에 준하여 채취하였다. 요중 납, 카드뮴 분석은 원자흡광도법으로 Thermo scientific IE3400을 사용하였고, 요중 수은은 가열기화 금아말감법으로 DMA-80 Direct Mercury Analyzer를 사용하여 <표 II-12>에 제시된 분석조건으로 분석하였다.

<표 II-12> 요충 납 분석조건

Spectrometer parameters—Pb						
Measurement Mode				Absorbance		
Wavelength				283.3nm		
Bandpass				0.5nm		
Lamp Current				90%		
Background Correction				Zeeman		
Signal Type				Transient		
Transient Type				Height		
Number Of Resamples				2		
Measurement Time				3.0secs		
Furnace Program(92.6secs)						
Phase	Temp(℃)	Time(sec)	Ramp (℃/sec)	Gas Type	Gas Flow	Commands
1	90	25.0	10	2	0.2L/min	
2	120	20.0	10	2	0.2L/min	
3	600	20.0	50	2	0.2L/min	
4	1500	3.0	0	2	Off	RD TC
5	2700	3.0	0	2	0.2L/min	TC
Auto sampler parameters						
Working Volume				10.0μl		
Sample Volume				10.0μl		
Slow Injection				Yes		
Sampling Delay				No		
Slow Solution Uptake				Yes		
Number of Washes				1		
Sample Preparation				None		
Std Additions				Pre—mixed		
Standard Preparation				Manual		

<표 II-13> 요충 카드뮴 분석조건

Spectrometer parameters—Cd						
Measurement Mode				Absorbance		
Wavelength				228.8nm		
Bandpass				0.5nm		
Lamp Current				50%		
Background Correction				Zeeman		
Signal Type				Transient		
Transient Type				Height		
Number Of Resamples				2		
Measurement Time				4.0secs		
Furnace Programme(85.3secs)						
Phase	Temp(℃)	Time(sec)	Ramp (℃/sec)	Gas Type	Gas Flow	Commands
1	50	10.0	5	2	0.2L/min	
2	90	5.0	5	2	0.2L/min	
3	110	15.0	5	2	0.2L/min	
4	280	25.0	135	2	0.2L/min	
5	1000	4.0	0	2	Off	RD TC
6	2700	3.0	0	2	0.2L/min	TC
Autosampler parameters						
Working Volume				10.0μl		
Sample Volume				10.0μl		
Slow Injection				Yes		
Sampling Delay				No		
Slow Solution Uptake				Yes		
Number of Washes				1		
Sample Preparation				None		
Std Additions				Pre—mixed		
Standard Preparation				Manual		

<표 II-14> 요중 수은 분석조건

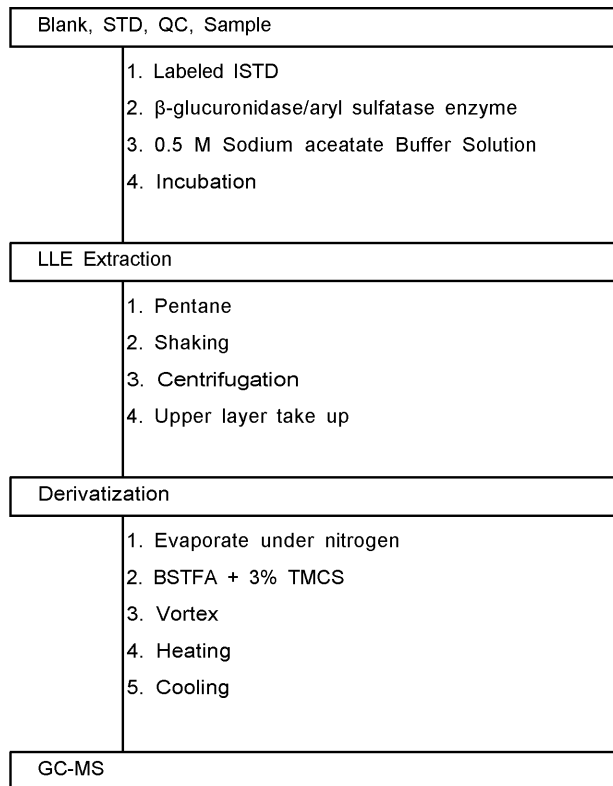
Items		Condition		
Max Start Temperature		300℃		
Purge Time		60 Sec		
Amalgamator Heating Time		12 Sec		
Signal Recording Time		30 Sec		
Method	Drying		Time(min)	Temperature(℃)
		Step1	01:00	200
		Step2	01:00	200
	Decomposition	Step1	02:40	650
		Step2	04:00	650

8) 요중 PAHs 대사산물

요중 PAHs 대사산물은 다음 4종에 대해 분석을 실시하였다. 국민환경보건 기초조사를 수행한 전문 분석기관에 의뢰하여 동일한 분석방법으로 진행하였다.

<표 II-15> 분석대상 요중 PAHs 대사산물

분석대상물질	전구물질	분자식	분자량
1-Hydroxypyrene (1-OHP)	Pyrene	C ₁₆ H ₁₀ O	218.25 g/mol
2-Naphthol (2-NAP)	Naphthalene	C ₁₀ H ₈ O	144.17 g/mol
2-Hydroxyfluorene (2-FLU)	Fluorene	C ₁₃ H ₁₀ O	182.07 g/mol
1-Hydroxyphenanthrene (1-PHE)	Phenanthrene	C ₁₄ H ₁₀ O	194.07 g/mol



[그림 II-13] 소변 중 PAHs 대사체 분석절차 및 분석기기 (Clarus 680-SQ8T, Perkin Elmer, US)

<표 II-16> 소변 중 PAHs 대사체 분리조건 (GC)

구 분	조 건
Column	Agilent HP-5MS
Injector Temp.	280 °C
Carrier gas	1He, 1.1 mL/min, Constant flow
Split/Splitless	Splitless, split on after 1 min (49 : 1)
Injection volume	2 uL
Oven temperature	95 °C, Hold 2 min 15.0 °C/min to 155 °C 5 °C/min to 26 °C 40.0 °C/min to 320 °C, Hold 3 min Transfer line 250 °C

<표 II-17> 소변중 PAH 특정이온 선택 조건 (MS)

구 분	조 건				
Ionization Mode	Electro Impact Ionization(EI)				
SIM Mode	Analyte	RT	Mass	m/z	
				Precursor Ion	Product Ion
표 준 물 질	1-OHP	24.37	218	275	290
	2-NAP	9.52	144	201	216
	1-OHPhe	19.00	194	251	266
	2-OHFlu	16.17	182	239	254
내부표준물질	1-OHP-d9	24.30	227	284	299
	2-NAP-d8	9.48	152	209	224

<표 II-18> 소변 중 다환방향족탄화수소 대사체 검정곡선 농도 및 검출한계

구분	항목	1-OHP	2-NAP	1-PHE	2-FLU
STD	최저농도	0.5	2.0	0.15	0.15
	최고농도	20.0	500.0	6	6
	Point (n)	6	6	6	6
	바탕용매	methanol	acetonitrile	methanol	methanol
ISTD	종류	D9	D8	—	—
	적용여부	○	○	○	○
MDL	실험결과	0.014	0.036	0.013	0.018
	참고 (CDC)	0.01	0.09	0.01	0.01

9) 요중 프탈레이트

요중 프탈레이트류는 프탈레이트별 전구물질에 해당하는 대사물질 8종에 대해 분석을 실시하였다. 국민 환경보건 기초조사를 수행한 전문분석기관에 의뢰하여 동일한 분석방법으로 진행하였다.

<표 II-19> 요중 프탈레이트류 분석대상 물질 8종

분석대상물질	전구물질	분자식	분자량
Mono-(2-Ethyl-5-Hydroxyhexyl) Phthalate (MEHHP)	Di(2-ethylhexyl) phthalate (DEHP)	$C_{16}H_{22}O_5$	294.34 g/mol
Mono-(2-Ethyl-5-Oxoohexyl) Phthalate (MEOHP)	Di(2-ethylhexyl) phthalate (DEHP)	$C_{16}H_{20}O_5$	292.33 g/mol
Mono-N-Butyl Phthalate (MnBP)	Di-n-butyl phthalate (DBP)	$C_{12}H_{14}O_4$	222.24 g/mol
Mono-(2-Ethyl-5-Carboxypentyl) Phthalate (MEHPP)	Di(2-ethylhexyl) phthalate (DEHP)	$C_{16}H_{20}O_6$	308.33 g/mol
Monobenzyl Phthalate (MBzP)	Benzylbutyl phthalate (BzBP)	$C_{15}H_{12}O_4$	256.25 g/mol
Mono(3-carboxypropyl) Phthalate(MCPP)	Di-n-octyl phthalate (DOP) Di-n-butyl phthalate (DBP)	$C_{12}H_{12}O_6$	252.22 g/mol
Mono-ethyl Phthalate (MEP)	Di-ethyl phthalate (DEP)	$C_{10}H_{10}O_4$	194.18 g/mol
Mono-methyl Phthalate (MMP)	Di-methyl phthalate (DMP)	$C_9H_8O_4$	180.16 g/mol

분석은 샘플 시료, 표준 시료 준비, 효소 활성화, 액액 추출, 질소 농축 후 증기화 과정을 거친 후, LC/MS 기기로 분석하였다. 분석 절차와 조건은 [그림 II-14], <표 II-20>, <표 II-21>과 같다.

Blank, STD, Sample, QC	
	→ 0.5 mL
Enzyme Activation	
	→ ISTD → Buffer(pH 6.5) → 효소 용액 → 37℃에서 16시간 반응
Liquid Liquid Extraction	
	→ Cooling → 염산용액 → 추출용매 첨가 → 1시간동안 진탕 후 원심분리 후 새 갈색 유리관에 옮김
Evaporate Under Nitrogen	
	→ 질소농축 → 농축 후 dissolve 용액 첨가
LC-MS/MS analysis	



[그림 II-14] 소변 중 프탈레이트 대사체 분석절차 및 분석기기 (Agilent 6490, Agilent, Palo Alto, CA, USA)

<표 II-20> 소변 중 프탈레이트 대사체 분리조건 (HPLC)

구 분	조 건			
Column	C18 column (150 x 2.1 mm, 2um)			
Flow rate	0.35 mL/min			
Column temperature	30 ℃			
Mobile phase	A : 0.05% Acetic acid in Water B : 0.05% Acetic acid in ACN			
	Time (min)	B (%)	Flow rate	Total 18 min
	0.00	5.00	0.35 mL/min	
	0.30	5.00		
	4.00	10.00		
	8.00	25.00		
	8.30	40.00		
	12.00	60.00		
	13.00	60.00		
	13.50	5.00		
	15.00	5.00		
Injection volume	5 μL			
Quantification mode	MRM mode			

<표 II-21> 특정이온 선택조건 (MS)

구 분	조 건			
Ionization Mode	Electron Spray Ionization(ESI) Negative			
SIM Mode	Analyte	RT	m/z	
			Precursor Ion	Product Ion
표 준 물 질	MEHHP	9.665	293.0	121.1
	MEOHP	10.030	291.1	121.0
	MnBP	9.966	221.1	76.9
	MECPP	9.493	307.1	159.0
	MBzP	10.604	255.1	183.0
	MCPP	6.340	251.1	103
	MEP	7.203	193.1	42.9
	MMP	5.876	179.2	77.2
내부표준물질	MEHHP(¹³ C ₄)	9.668	297.0	124.1
	MEOHP(¹³ C ₄)	10.029	295.0	124.2
	MnBP(¹³ C ₂)	9.965	225.0	79.1
	MECPP(¹³ C ₄)	9.492	311.0	159.2
	MBzP(¹³ C ₂)	10.600	259.0	77.1
	MCPP(¹³ C ₄)	6.338	255.0	103.0
	MEP(¹³ C ₄)	7.201	193.1	42.9
	MMP(¹³ C ₄)	5.878	179.2	77.2

<표 II-22> 소변 중 프탈레이트 검정곡선 농도 및 ISTD, 검출한계

구분	항목	MEHHP	MEOHP	MECPP	MBzP	MnBP	MCPP	MEP	MMP
STD	최저농도	1.0	1.0	2.0	0.5	2	0.5	2.0	0.5
	최고농도	120	120	240	60	240	60	240	60
	Point (n)	6	6	6	6	6	6	6	6
	바탕용매	MeOH	MeOH	MeOH	MeOH	MeOH	MeOH	MeOH	MeOH
ISTD	종류	$^{13}\text{C}_4$	$^{13}\text{C}_4$	$^{13}\text{C}_4$	$^{13}\text{C}_2$	$^{13}\text{C}_2$	$^{13}\text{C}_4$	$^{13}\text{C}_4$	$^{13}\text{C}_4$
	적용여부	0	0	0	0	0	0	0	0
MDL	산출결과	0.079	0.066	0.068	0.037	0.078	0.068	0.104	0.061

10) 요중 8-OHdG

요중 8-OHdG는 Liquid chromatography-tandem mass spectrometry를 이용하여 측정하였다. 표준액과 검체를 SPE cartridge를 이용하여 정제한 후 농축하여 LC-MS/MS로 측정한다. 표준 시약으로 8-OHdG (제조사 : Sigma, 제조국 : USA), 내부 표준 시약으로 $^{15}\text{N}_5$ 8-OHdG (제조사 : Cambridge Isotope, 제조국 : USA)를 사용하였다. 측정기기는 API 4000 LC-MS/MS system (제조사 : Applied Biosystems, 제조국 : USA)을 사용하였다.

3. 기타사항

연구참여 대상 사업장, 근로자의 선정은 사전에 노동조합, 근로자 대표를 통해 섭외하였으며, 모든 조사과정, 참여는 근로자의 자발적 동의를 거친 후 진행되었다. 본 연구과제는 영남대학교 생명윤리위원회의 심의를 거쳤다(YU 2021-06-009-001).

Ⅲ. 연구결과

.....

III. 연구결과

1. 국·내외 연구동향

산업안전보건연구원에 역학조사가 의뢰된 직업병 사례집을 살펴보면, 소각장 관련 사례는 총 7건인데 이 중 2건에서 업무관련성이 높은 것으로 평가되었다. 일산화탄소 노출에 의한 울혈성 심부전과, 분진, 질소산화물, 황산화물에 의한 폐기종, 기관지천식 사례가 확인되었다. 폐암, 급성 림프성 백혈병 등 암에 대한 심의 사례는 있으나 업무관련성은 낮은 것으로 평가되었다.

<표 III-1> 소각장 근무자의 직업병 사례

번호	제 목	심의 년도	업무관 련성
1	폐목 소각작업을 하는 근로자에게 발생한 폐암	1999	낮음
2	소각작업 근로자에게 발생한 급성 림프성 백혈병	2001	낮음
3	산업폐기물 소각작업에서 발생한 폐기종과 기관지 천식	1999	높음
4	소각 작업자에게 발생한 울혈성 심부전	2001	높음
5	폐기물 소각업을 하던 근로자에게 발생한 폐암	2002	낮음
6	목공 및 소각 근로자에서 발생한 만성폐쇄성폐질환	2004	낮음
7	소각장 관리 작업자에서 발생한 유육종증	2017	낮음

소각시설 관련 유해인자에 대한 연구와 평가에 관한 문헌고찰을 위해, Pubmed에 ‘waste incineration’(폐기물 소각), ‘incineration health’의 검색어로 문헌 검색을 하였고, 제목과 초록을 통해 소각장 관련 건강영향을 연구한 논문을 정리하였다. 이 논문들을 주제, 내용에 따라 크게 6가지의 건강영향 또는 유해인자별로 정리하였다.

1) 다이옥신과 퓨란(PCDD/Fs)

다이옥신은 화합물 제조 및 폐기물 소각 처리과정에서 배출되는 대표적인 잔류성유기오염물질로서, 생체 내에 장기간 축적되면서 암발생 및 신경장애 등을 유발하는 유해물질로 알려져 있다. 특히, 동물실험에서 치사량인 LD₅₀이 6-20 μ g/kg 으로 매우 낮아⁹⁾¹⁰⁾, 일반인들에게도 대표적인 독성 물질로 널리 알려져 있다. 다이옥신은 한가지 특정 화합물을 지칭하는 것이 아닌 PCDD(polychlorinated dibenzo-p-dioxins)와, PCDF(polychlorinated dibenzofurans)를 통칭한다. 이중 가장 독성이 있는 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin(TCDD)를 기준으로 각 유사체의 상대 독성값을 곱하여 다이옥신류의 독성등가계수(Toxicity equivalency, TEQ)로 나타낸다.

Yamamoto 등¹¹⁾은 소각장 근무자 16명을 8년간 추적관찰하며 혈중 PCDD/PCDF의 농도를 확인하였다. 지역의 농업에 종사하는 인구보다 PCDD의 경우 4.7배, PCDF는 21.2배 높게 측정되었다. 큰 차이를 보이는 결과이나, 연구대상 소각장이 1997년에 운영이 중지된 구형 소각장이므로 현대의 소각장의 결과와 비교하기에는 무리가 있는 점이 한계로 지적되었다.

Reis 등¹²⁾의 연구에서도 오래된 구형 소각장 주변 지역 여성의 모유에서, 현대식 소각장 주변의 여성의 모유보다 다이옥신이 높게 측정되어, 구형소각장에 대한 노출 제어, 시설의 공학적 열등성을 간접적으로 보여주었다. Leem 등¹³⁾의 연구에서도 산업폐기물 소각장 주변 거주민들의

9) Institute of Medicine. Veterans and Agent Orange: The National Academy Press: Washington, DC, 2009; p 7.

10) <https://www.ilo.org/legacy/english/protection/safework/cis/products/safetytm/toxic.htm>

11) Yamamoto K, Kudo M, Arito H, Ogawa Y, Takata T. Isomer pattern and elimination of dioxins in workers exposed at a municipal waste incineration plant. Ind Health. 2015; 53(5): 454- 64.

12) Reis MF, Sampaio C, Aguiar P, Mauricio Melim J, Pereira Miguel J, Papke O. Biomonitoring of PCDD/Fs in populations living near Portuguese solid waste incinerators: Levels in human milk. Chemosphere. 2007; 67(9): S231- 7.

혈중 다이옥신이 생활폐기물 소각장 주변 거주민, 근로자들보다 4배 이상 높게 측정되어, 산업폐기물 관련 다이옥신 노출이 더 많음을 간접적으로 시사하였다.

다이옥신의 노출은 음식의 섭취도 하나의 주요한 경로인데, Chen 등¹⁴⁾의 연구에서 스페인의 19개 소각장 인근 주민 1,709명을 대상으로 혈중 다이옥신을 분석한 결과 해당 지역에서 생산되는 음식을 섭취하는 인구에서 유의하게 높게 측정되었다. Ranzi 등¹⁵⁾, Cordier 등¹⁶⁾의 연구에서도 유사한 보고를 하였다. 음식의 섭취 정도와 생산 경로 등이 혼란변수일 수 있지만 소각장에 가깝게 거주하는 것을 노출의 정도로 간주하여 평가하였다. 이상의 연구에서 다이옥신의 노출은 신형 소각장 보다는 구형 소각장, 일반 폐기물보다는 산업폐기물 소각장에서 더 노출이 되는 경향이 보고되었으며, 소각장에 가까울수록 노출이 증가하고, 음식을 통한 노출 경로도 주요한 것으로 확인되었다.

13) Leem JH, Hong YC, Lee KH, Kwon HJ, Chang YS, Jang JY. Health survey on workers and residents near the municipal waste and industrial waste incinerators in Korea. *Ind Health*. 2003; 41(3): 181- 8.

14) Chen HL, Su HJ, Lee CC. Patterns of serum PCDD/Fs affected by vegetarian regime and consumption of local food for residents living near municipal waste incinerators from Taiwan. *Environ Int*. 2006; 32(5): 650- 5.

15) Ranzi A, Fustinoni S, Erspamer L, Campo L, Gatti MG, Bechtold P, et al. Biomonitoring of the general population living near a modern solid waste incinerator: a pilot study in Modena, Italy. *Environ Int*. 2013; 61: 88- 97.

16) Cordier S, Lehebel A, Amar E, Anzivino-Viricel L, Hours M, Monfort C, et al. Maternal residence near municipal waste incinerators and the risk of urinary tract birth defects. *Occup Environ Med*. 2010; 67(7): 493- 9.

<표 III-2> 다이옥신 관련 문헌

저자	출판 년도	연구 기간	국가	소각방식	연구방법	연구 대상수	연구주제	결과
Chen et al	2006	2000-2001	대만	다수의 도시고형폐기물 소각장, 특정 세부 사항 미상	단면연구	1,129	인체 외부 측정, 기타 건강 효과	혈중 다이옥신 수치와 고혈압 사이의 상당한 연관성이 존재
Chen, Su & Lee	2006	2000-2004	대만	다수의 도시고형폐기물 소각장, 특정 세부 사항 미상	코호트연구	1,708	인체 외부 측정, 인체 내부 측정	혈중 다이옥신 수치와 현지 생산 식품 섭취 사이의 상당한 연관성이 존재
Domingo et al	2002	1998-2000	스페인	2000년에 업그레이드된 도시고형폐기물 소각장, 산성 가스 및 금속 배출 제한 장비, 활성탄	시뮬레이션 모델 연구	해당 없음	인체 외부 측정	도시고형폐기물 소각장의 기술 향상과 관련된 다이옥신 수치의 상당한 감소
Kumagai & Koda	2005	2000-2001	일본	감염성 폐기물 소각장, 2000년 폐쇄, 특정 세부 사항 미상	단면연구	10	인체 내부 측정	직업적 노출과 관련된 혈중 다이옥신 수치의 상당한 증가

Kumagai, Koda & Oda	2003	미상	일본	도시고형폐기물 소각장, 스토커 유형, 전기집진 기, 2000년에 철거된 유 독 가스 스크러버	단면연구	127	인체 외부 측정, 인체 내부 측정	직업적 노출과 관련된 혈중 다이옥신 수치의 상당한 증가
Leem et al	2003	미상	한국	다수의 도시고형폐기물 소각장, 하나의 산업 폐 기물 소각로, 특정 세부 사항 미상	단면연구	39	인체 내부 측정	산업폐기물 소각장 노 출과 관련된 혈중 다 이옥신의 상당한 증가
Lim et al	2004	1997	한국	도시고형폐기물 소각장, 특정 세부 사항 미상	단면연구	35	인체 내부 측정	노출과 관련된 혈중 다이옥신 수치의 상당 한 증가
Takata	2003	1998	일본	도시고형폐기물 소각장, 전기 집진기 및 습식 스 크러버	단면연구	192	인체 내부 측정	소각로 청소/유지관리 에 종사하는 근로자의 다이옥신 농도의 유의 한 증가
Yamamoto et al	2015	2000- 2007	일본	다수의 도시고형폐기물 소각장, 특정 세부 사항 미상	단면연구	678	인체 내부 측정, 기타 건강 효과	증가된 혈중 다이옥신 수치와 고혈압 및 당 뇨병 사이의 유의한 연관성

3) 중금속

Deng 등¹⁷⁾은 중국의 35개 소각장 근무자와 269명의 지역주민, 143명의 대조군을 대상으로 수은노출 수준을 연구한 결과, 음식 섭취 등 교란 변수를 보정한 이후에도 소각장 근무자와 노출군에서 유의하게 높은 수은 농도를 확인하였다. Reis 등¹⁸⁾은 스페인의 497명의 소아에서 혈액과 모발에서 납 농도를 측정하였는데, 통상의 노출기준보다는 낮았으나, 노출군에서 대조군보다 유의하게 높은 납 농도가 확인되었다. 또한, 노출된 산모와 태아에서도 역시 노출기준보다는 낮으나 유의하게 높은 납 노출이 확인되었다.

Chao 등¹⁹⁾은 소각장 근로자에서 연령과 성별을 짝지은 지역주민과 대조하였을 때, 유의하게 높은 혈중, 요중 비소의 농도를 보고하였다. 근무 시간 중 활성탄소를 이용한 마스크를 사용한 근로자에서 낮은 노출 수준을 보여, 보호구 착용의 중요성을 시사하였다. Ranzi 등²⁰⁾은 65명의 소각장 근무, 또는 지역 거주자에서 103명의 대조군에 비해 유의하게 높고, 용량 반응 관계를 보이는 중금속 농도를 보고하였다.

17) Deng C, Xie H, Ye X, Zhang H, Liu M, Tong Y, et al. Mercury risk assessment combining internal and external exposure methods for a population living near a municipal solid waste incinerator. *Environ Pollut.* 2016; 219: 1060- 8.

18) Reis MF, Sampaio C, Brantes A, Aniceto P, Melim M, Cardoso L, et al. Human exposure to heavy metals in the vicinity of Portuguese solid waste incinerators - part 3: Biomonitoring of Pb in blood of children under the age of 6 years. *Int J Hyg Environ Health.* 2007;210(3-4):455-9

19) Chao CL, Hwang, KC. Arsenic burden survey among refuse incinerator workers. *J Postgrad Med.* 2005; 51(2): 98- 103.

20) Ranzi A, Fustinoni S, Erspamer L, Campo L, Gatti MG, Bechtold P, et al. Biomonitoring of the general population living near a modern solid waste incinerator: a pilot study in Modena, Italy. *Environ Int.* 2013; 61: 88- 97.

<표 III-3> 중금속 관련 문헌

저자	출판 년도	연구 기간	국가	소각방식	연구방법	연구 대상수	연구주제	결과
Deng et al	2016	2012	중국	4,200t/년 용량의 도시고형폐기물 소각장, 회전분무기, 백 필터, 습식 스크러버, 선택적 환원촉매	단면연구	447	인체 내부 측정	노출된 그룹과 작업자의 혈중 수은의 상당한 증가
Chao & Hwang	2005	2004	대만	1,500t/년 용량의 도시고형폐기물 소각장, 슬래그 추출기, 반죽기, 전기집진기, 습식 스크러버, 선택적 촉매 반응기	단면연구	122	인체 내부 측정	직업적 노출과 관련된 소변 및 혈중 비소 수치의 상당한 증가
Lee et al	2012	2009	한국	도시고형폐기물 소각장, 특정 세부 사항 미상	단면연구	946	인체 내부 측정	노출과 관련된 혈중 납과 카드뮴 수치의 상당한 증가
Li et al	2017	2013-2014	중국	400t/일 용량의 도시고형폐기물 소각장, 특정 세부 사항 미상	단면연구	425	인체 외부 측정, 인체 내부 측정	도시고형폐기물 소각장 인근 사람들의 혈액과 채소의 납/크롬 농도의 상당한 증가
Maitre et al	2003	1995	프랑스	다수의 도시고형폐기물 소각장, 시간당 11-14t의 용량 범위, 전기집진기, 석회 스크러버	단면연구	46	인체 외부 측정, 인체 내부 측정	노출된 장소에서 대기 중 미세먼지와 중금속 수치의 상당한 증가

4) 다환방향족탄화수소(PAHs)

다환방향족탄화수소도 다수의 연구에서 유사하게 구형의 소각시설에서, 신형의 소각시설보다 더 많은 노출이 나타나는 것이 확인되었다. Ichiba 등²¹⁾의 연구에 따르면, 4개의 소각장에서 100명의 근로자들을 대상으로 연구를 한 결과, 오래된 소각장에서 근무하는 근로자의 소변에서 현대식 소각장에 근무하는 근로자에서보다 유의하게 높은 PAHs 대사산물이 확인되었다. Oh 등²²⁾의 연구에서 요중 PAHs 대사 산물이 대조군에 비해 근로자에서 통계적으로 유의하게 1.5배 높게 나타났고, Ranzi 등²³⁾의 연구에서도 소변의 PAHs 대사산물이 대조군에 비해 유의하게 높게 나타난 결과를 보였다.

21) Ichiba M, Ogawa Y, Mohri I, Kondoh T, Horita M, Matsumoto A, et al. Analysis of urinary metabolites of polycyclic aromatic hydrocarbons in incineration workers. J Occup Health. 2007; 49(2): 159- 64.

22) Oh E, Lee E, Im H, Kang HS, Jung WW, Won NH, et al. Evaluation of immuno- and reproductive toxicities and association between immunotoxicological and genotoxicological parameters in waste incineration workers. Toxicology. 2005; 210(1): 65- 80.

23) Ranzi A, Fustinoni S, Erspamer L, Campo L, Gatti MG, Bechtold P, et al. Biomonitoring of the general population living near a modern solid waste incinerator: a pilot study in Modena, Italy. Environ Int. 2013; 61: 88- 97.

<표 III-4> 다환방향족탄화수소 관련 문헌

저자	출판 년도	연구 기간	국가	소각방식	연구방법	연구 대상수	연구주제	결과
Gatti et al	2017	2012- 2013	이탈리아	180,000t/년 용량의 도시고형폐기물 소각장, 1980년에 지어지고 2010년에 개조	단면연구	488	인체 내부 측정	노출과 관련된 소변 다환방향족탄화수소 (PAHs) 수치의 상당한 증가
Ichiba et al	2007	미상	일본	다수의 도시고형폐기물 소각장, 먼 백 필터가 있는 스토커 용광로, 전기집진기; 전기집진기가 있는 산업용 폐기물 소각로 로터리 킬른 연소기	단면연구	100	인체 내부 측정	노후 도시고형폐기물 소각장 노출과 관련된 소변 2-NP의 상당한 증가
Ranzi et al	2013	2010	이탈리아	180,000t/년 용량의 도시고형폐기물 소각장, 1980년에 지어지고 2010년에 개조	단면연구	168	인체 내부 측정	노출과 관련된 혈중 카드뮴과 수은, 그리고 소변의 망간, 플루오렌, 페난트렌, 안트라센, 피렌, 다환방향족탄화수소의 상당한 증가

5) 발암성

소각시설과 관련한 발암성에 대한 논란은 꾸준히 이어져 오고 있다. 국내에서도 충북 청주시 북이면의 사례에서 인근 지역주민들의 암발생이 전국대비 발생비가 1.13(1.02-1.24)로 나타났는데, 암종별로 식도암 1.93(1.07-3.02), 위암 1.31(1.09-1.55), 폐암 1.35(1.11-1.63)으로 유의하게 높게 나타나 주민건강 실태조사가 진행되었다. 소각장과의 인과관계가 명확하게 밝혀지지 않는다고 있으나, 주민들의 카드뮴이 대조군에 비해 유의하게 높게 나타났고, 소각장에 가까운 거주민일수록 높게 나타나는 경향성과, 요중 8-OHdG가 높게 나타난 점 등이 소각장 관련 발암성의 근거로 제시되고 있다. 그러나, 인근 공단, 폐광 등의 복합적 요인에 작용하였을 가능성으로 인해, 소각장의 단독 영향을 논하기에는 아직 근거가 부족하다.

국외 다수의 연구에서 소각시설과 다양한 암종의 연구가 보고되고 있다. 비호지킨림프종과의 연관성을 Floret 등²⁴⁾이 보고 하였는데, 소각장 인근 지역주민에서 발생한 222건의 비호지킨 림프종은 대조군에 비해 비호지킨림프종의 위험도는 2.3배(95% 신뢰구간 1.4-3.8)높게 나타났다. 발암성에 대한 원인으로는 배출되는 다이옥신을 언급하였는데, 0.0004pg/m³ 이상에서 위험도가 증가하였다. Viel 등²⁵⁾은 1990년에서 1999년의 관찰기간동안, 3,974건의 비호지킨림프종의 사례를 분석하였는데, 소각장 지역에서 다이옥신 노출이 높은 그룹에서 노출이 적은 그룹에 비해 비호지킨림프종의 비교위험도를 1.12(신뢰구간 1.002-1.251)로 제시하였다.

소각장과 관련된 암으로서 연부조직 육종(Soft tissue sarcoma)에 대

24) Floret N, Mauny F, Challier B, Arveux P, Cahn JY, Viel JF. Dioxin emissions from a solid waste incinerator and risk of non-Hodgkin lymphoma. *Epidemiology*. 2003; 14(4): 392- 8.

25) Viel JF, Daniau C, Gorla S, Fabre P, de Crouy-Chanel P, Sauleau EA, et al. Risk for non-Hodgkin's lymphoma in the vicinity of French municipal solid waste incinerators. *Environ Health*. 2008; 7: 51.

한 보고가 있었다. Zambon 등²⁶⁾은 연부조직 육종과 소각장에서 배출되는 다양한 인자와의 관련성을 분석하였는데, $6\text{fg}/\text{m}^3$ 이상의 다이옥신 농도에서 연부조직 육종의 비차비가 3.27(95%CI 1.35–7.93)으로 확인되었다. 이탈리아의 한 연구²⁷⁾에서는 소각장 반경 2km내에 거주하는 주민들의 연부조직 육종의 비차비가 31.4(95%CI 5.6–176.1)로 상당히 높게 나타났는데, 이 지역에서의 배출가스 규제가 거의 이루어지지 않은 것으로 드러났다.

Ranzi 등²⁸⁾은 소각장 주변 거주민의 코호트 연구를 통해 대장암의 위험도가 높은 것을 밝혔는데, 남성에서 대장암의 사망비가 2.1(95%CI 1.1–4.4), 여성에서의 발생비가 2.0(95% CI 1.3–3.06)으로 유의하게 높게 나타났다. Parodi 등²⁹⁾은 단면연구를 통해 토양의 중금속 농도와 폐암의 사망과의 연관성을 분석하였다. 그 결과, 여성에서 높은 노출이 있었던 군에서 상대위험도 2.14(95% CI 1.09–4.20), 낮은 노출이 있었던 군에서 1.54(95% CI 1.01–2.36)으로 나타났다.

이 외에도 소각장과 관련된 다양한 암종에 대한 연구가 다수 확인되었는데, Federico 등³⁰⁾은 다수의 소각장 주변에 거주하는 대규모 인구 집단에서 생태학적 연구를 통해 위암, 담낭암, 폐암의 관련성을 밝혔다. 모든 암종을 종합하여 평가하였을 때, 1.06(95%CI 1.04–1.09)의 사망비

-
- 26) Zambon P, Ricci P, Bovo E, Casula A, Gattolin M, Fiore AR, et al. Sarcoma risk and dioxin emissions from incinerators and industrial plants: A population-based case-control study (Italy). *Environ Health*. 2007; 6: 19.
- 27) Comba P, Ascoli V, Belli S, Benedetti M, Gatti L, Ricci P, et al. Risk of soft tissue sarcomas and residence in the neighbourhood of an incinerator of industrial wastes. *Occup Environ Med*. 2003; 60(9): 680– 3.
- 28) Ranzi A, Fano V, Erspamer L, Lauriola P, Perucci CA, Forastiere F. Mortality and morbidity among people living close to incinerators: A cohort study based on dispersion modelling for exposure assessment. *Environ Health*. 2011; 10: 22.
- 29) Parodi S, Baldi R, Benco C, Franchini M, Garrone E, Vercelli M, et al. Lung cancer mortality in a district of La Spezia (Italy) exposed to air pollution from industrial plants. *Tumori*. 2004; 90(2): 181– 5.
- 30) Federico M, Pirani M, Rashid I, Caranci N, Cirilli C. Cancer incidence in people with residential exposure to a municipal waste incinerator: An ecological study in Modena (Italy), 1991–2005. *Waste Manag*. 2010; 30: 1362– 70.

로 나타났다. 그러나 일본의 일부 연구에서는 암과의 관련성이 나타나지 않은 연구결과도 있었다. Fukuda 등³¹⁾은 소각장 인근 지역 주민들의 다양한 노출기간, 다이옥신 노출과 암의 관련성을 분석하였을 때 유의한 결과는 보이지 않은 것으로 보고하였다. 또한, Domingo 등³²⁾은 사례분석을 통해 소각장 인근의 공기와 토양의 발암 위험도가 심하더라도 일반 산업 시설 수준을 넘지는 않는다고 결론지었다. Perez 등³³⁾도 두 곳의 소각장 주변 조사를 하였으나, 소각장의 인접성과 발암성의 증가에 대한 결론은 내리지 못하였다. 현재까지는 연부조직암과 비호지킨림프종의 발생이 가장 연관성이 높은 암종으로 알려져 있으나, 다른 암에 대한 연관성도 연구에 따라 편향, 교란변수의 통제에 따라 일관된 결과를 보이지 않으나, 연관성을 완전히 배제할 수는 없다.

31) Fukuda Y, Nakamura K, Takano T. Dioxins released from incineration plants and mortality from major diseases: An analysis of statistical data by municipalities. J Med Dent Sci. 2003; 50(4): 249- 55.

32) Domingo JL, Rovira J, Vilavert L, Nadal M, Figueras MJ, Schuhmacher M. Health risks for the population living in the vicinity of an integrated waste management facility: Screening environmental pollutants. Sci Total Environ. 2015; 518-519C: 363 - 70.

33) Garcia-Perez J, Fernandez-Navarro P, Castello A, Lopez-Cima MF, Ramis R, Boldo E, et al. Cancer mortality in towns in the vicinity of incinerators and installations for the recovery or disposal of hazardous waste. Environ Int. 2013; 51: 31- 44.

<표 III-5> 발암성 관련 문헌

저자	출판 년도	연구 기간	국가	소각방식	연구방법	연구 대상수	연구주제	결과
Comba et al	2003	1989- 1998	이탈리아	1,750 kg/h 용량의 액체 및 고체 폐기물 소각로, 생활폐기물과 유독성 폐기물의 혼합	환자-대조군 연구	108	암	노출과 관련된 연조직육종의 상당한 증가
Domingo et al	2015	2014	스페인	1975년에 건설된 기계적 생물학적 처리 시설 및 폐기물 에너지화 도시고형폐기물 소각장 결합	시뮬레이션 모델 연구	해당 없음	인체 외부 측정, 암, 기타 건강 효과	노출과 관련된 비발암성 위험 지수의 증가: 유의수준 미상
Federico et al	2010	1991- 2005	이탈리아	140,000t/년 용량의 도시고형폐기물 소각장, 연도가스 건식 스크러버, 활성탄, 선택적 비촉매 환원법	생태학적 연구	16,433	암	유의미하지 않음
Floret et al	2003	1980- 1995	프랑스	67,000t/년 용량의 도시고형폐기물 소각장, 1971년에서 1976년 사이에 지어진 연소실	환자-대조군 연구	440	암	노출과 관련된 비호지킨 림프종 위험의 상당한 증가

Fukuda et al	2003	1995	일본	다수의 도시고형폐기물 소각장, 특정 세부 사항 미상	단면연구	해당 없음	인체 외부 측정, 암, 기타 건강 효과	유의미하지 않음
Garcia-Perez et al	2013	1997-2006	스페인	다양한 연식의 다수의 생활 및 유해 폐기물 소각로, 특정 세부 사항 미상	생태학적 연구	91,708	암	노출과 관련된 암(폐, 담낭, 위) 위험의 상당한 증가
Goria et al	2009	1972-1990	프랑스	프랑스 4개 지역에 16개 도시고형폐기물 소각장 공장	종단연구	해당 없음	인체 외부 측정, 암	유의수준 미상
Li, Nitivattananon & Li	2015	미상	중국	폐기물 에너지화 도시고형폐기물 소각장, 특정 세부 사항 미상	전과정 평가	해당 없음	인체 외부 측정, 암, 기타 건강 효과	폐기물 에너지 소각은 물질 회수가 가능한 퇴비에 비해 암의 위험성이 가장 높음: 유의수준 미상
Morselli et al	2008	미상	이탈리아	다수의 도시고형폐기물 소각장, 연간 15-150,000 t의 용량 범위, 건식 연도 가스 저감, 하이브리드 습식 건식 기술	전과정 평가	해당 없음	인체 외부 측정, 암, 기타 건강 효과	유의수준 미상

Morselli et al	2011	1997-2007	이탈리아	도시고형폐기물 소각장, 특정 세부 사항 미상	전 과정 평가	해당 없음	인체 외부 측정	노출된 장소에서 대기 중 니켈 및 발암성 벤조(a)피렌 수치의 상당한 증가
Parodi et al	2004	1988-1996	이탈리아	소규모 도시고형폐기물 소각장 (발전소 및 철강 산업과 결합), 특정 세부 사항 미상	단면연구	해당 없음	인체 외부 측정, 암	(폐기물 소각장, 발전소 및 산업 복합으로 인한) 오염물질 노출과 관련된 여성에서 폐암 사망률의 상당한 증가
Ranzi et al	2011	1990-2003	이탈리아	(1) 도시고형폐기물 소각장, 1976년부터 운영; (2) 병원 폐기물 소각로, 1991년부터 운영	종단연구	31,347	암, 기타 건강 효과	노출과 관련된 대장암과 폐암 위험의 상당한 증가
Viel et al a	2008	1990-1999	프랑스	다수의 도시고형폐기물 소각장, 특정 세부 사항 미상	코호트연구	3974	암	노출과 관련된 비호지킨 림프종 위험의 상당한 증가
Viel et al b	2008	1996-2002	프랑스	다수의 도시고형폐기물 소각장, 특정 세부 사항 미상	환자-대조군 연구	2604	암	유의미하지 않음
Zamboni et al	2007	1990-1996	이탈리아	다수의 도시고형폐기물 소각장, 산업 및 의료 폐기물 소각로, 특정 세부 사항 미상	환자-대조군 연구	610	암	노출과 관련된 육종 위험의 상당한 증가

6) 생식독성

소각장 근무자, 주변 거주민들의 조산, 정사 수, 운동성 감소, 선천 기형, 유산, 태아 사망 등에 대한 보고를 확인할 수 있었다. Santoro 등³⁴⁾은 이탈리아의 소각장 인근에서 태어난 3,153명의 출산을 분석한 결과, 혼란변수를 보정한 이후에도 조산의 비차비가 2.18(95% CI 1.05-4.53)으로 나타났다. Candela 등³⁵⁾이 수행한 대규모 연구에서도 8개 소각장 인근의 21,157명의 출산을 분석한 결과 소각장에서 배출되는 입자상 물질의 노출과 조산과의 연관성이 나타났는데, 비차비가 1.30(95% CI 1.08-1.57)로 유의하게 높았다. Lin 등³⁶⁾의 연구에서는 소각장 관련 노출군에서 재태기간이 근소하게 감소하는 것을 보고하였다.

Oh 등³⁷⁾은 6명의 소각장 근로자와 8명의 대조군의 정자수와 운동성을 비교한 단면연구에서 소각장 근로자에서 정자수와 운동성이 유의하게 감소한 것을 확인하였다. 또한 소각장 근로자의 정원세포에서 DNA손상도 더 많은 것으로 조사되었다. 연구 대상자수가 적은 것이 한계점이지만, 소각장 남성 근로자의 정자에서 직접적인 영향과 DNA손상을 확인한 연구라는 점에서 큰 의의가 있다.

34) Santoro M, Minichilli F, Linzalone N, Coi A, Maurello MT, Sallese D, et al. Adverse reproductive outcomes associated with exposure to a municipal solid waste incinerator. *Ann Ist Super Sanita*. 2016; 52(4): 576- 81.

35) Candela S, Ranzi A, Bonvicini L, Baldacchini F, Marzaroli P, Evangelista A, et al. Air pollution from incinerators and reproductive outcomes: A multisite study. *Epidemiology*. 2013; 24(6): 863- 70.

36) Lin CM, Li CY, Mao IF. Birth outcomes of infants born in areas with elevated ambient exposure to incinerator generated PCDD/Fs. *Environ Int*. 2006; 32(5): 624- 9.

37) Oh E, Lee E, Im H, Kang HS, Jung WW, Won NH, et al. Evaluation of immuno- and reproductive toxicities and association between immunotoxicological and genotoxicological parameters in waste incineration workers. *Toxicology*. 2005; 210(1): 65- 80.

<표 III-6> 생식독성 관련 문헌

저자	출판 년도	연구 기간	국가	소각방식	연구방법	연구 대상수	연구주제	결과
Candela et al	2013	2003- 2010	이탈리아	다수의 도시고형폐기물 소각장, 특정 세부 사항 미상	단면연구	21,157	생식건강	노출과 관련된 조산, 초미숙아 위험의 증 가
Candela et al	2015	2002- 2006	이탈리아	다수의 도시고형폐기물 소각장, 특정 세부 사항 미상	코호트연구	13,250	생식건강	노출과 관련된 유산 위험의 증가
Dummer, Dickinson & Parker	2003	1956- 1993	영국	다수의 도시고형폐기물 소각장, 특정 세부 사항 미상	코호트연구	224,758	생식건강	노출과 관련된 선천 성 심장 결함 및 척 추 갈림증 위험의 상당한 증가
Lin, Li & Mao	2006	1991- 1997	대만	900t/일 용량의 도시고 형폐기물 소각장, 특정 세부 사항 미상	단면연구	12,979	생식건강	노출된 그룹에서 출 생 시 재태 연령의 상당한 감소
Santoro et al	2016	2001- 2010	이탈리아	다수의 도시고형폐기물 소각장, 특정 세부 사항 미상	코호트연구	3,153	생식건강	노출과 관련된 조 산 위험의 상당한 증가

Tango et al	2004	1997-1998	일본	다수의 도시고형폐기물 소각장, 특정 세부 사항 미상	단면연구	229,437	생식건강	노출과 관련된 영아 사망 및 선천성 기형으로 인한 영아 사망 위험의 상당한 증가
Vinceti et al	2009	1998-2006	이탈리아	70,000t/년 용량의 도시고형폐기물 소각장, 건식 스크러버, 활성탄	환자-대조군 연구	456	생식건강	유의미하지 않음
Vinceti et al	2008	2003-2006	이탈리아	120,000t/년 용량의 도시고형폐기물 소각장, 건식 스크러버, 활성탄, 선택적 비촉매 환원법	단면연구	27	생식건강	유의미하지 않음

7) 기타질환

-호흡기계

일본과 이탈리아의 연구에 따르면, 소각장 근처에서의 거주와 그에 따른 다이옥신, 중금속, 질소 산화물의 노출로 인한 전체 사망률은 증가하지 않는 것으로 보고되었다³⁸⁾³⁹⁾. 국내의 연구에서도 소각장 근처의 주민들에게서 DALY(Disability-adjusted life years)를 제시하였고, 호흡기, 심장질환의 기여부담정도는 각각 2007년 서울시 인구의 0.2%, 0.1%로 평가하였다. Galise 등⁴⁰⁾에 따르면, $40\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 PM10이, 심혈관 질환의 사망률이 0.19%, 심장질환으로 인한 입원률을 0.06% 기여한다고 밝혔다. 또한, 호흡기계 질환으로 인한 사망률은 0.27%, 호흡기계 질환으로 인한 병원 입원율은 0.12% 기여한다고 평가하였다. Ranzi 등³⁰⁾도 다른 비교집단의 인구와 비교하였을 때, 소각장 근처의 주민들이 폐질환과 만성폐쇄성 폐질환(COPD)로 인한 사망률, 입원율 증가에 대한 가능성을 배제하는 결과를 발표하였다.

그러나, Hours 등⁴¹⁾, Charbotel 등⁴²⁾은 소각장 근로자들에게서 유의한 수준의 폐기능 감소를 확인하였고, 일부에서 직업적 유해요인과의 유출과의 연관성을 제시하였다.

- 내분비계

Chen 등⁴³⁾은 소각장 인근 지역주민의 혈중 다이옥신과 혈당 증가, 요

38) Fukuda Y, Nakamura K, Takano T. Dioxins released from incineration plants and mortality from major diseases: An analysis of statistical data by municipalities. J Med Dent Sci. 2003; 50(4): 249- 55.

39) Ranzi A, Fano V, Erspamer L, Lauriola P, Perucci CA, Forastiere F. Mortality and morbidity among people living close to incinerators: A cohort study based on dispersion modelling for exposure assessment. Environ Health. 2011; 10: 22.

40) Galise I, Serinelli M, Bisceglia L, Assennato G. Health impact assessment of pollution from incinerator in Modugno (Bari). Epidemiol Prev. 2012; 36(1): 27- 33.

41) Hours M, Anzivino-Viricel L, Maitre A, Perdrix A, Perrodin Y, Charbotel B, et al. Morbidity among municipal waste incinerator workers: A cross-sectional study. Int Arch Occup Environ Health. 2003; 76(6): 467- 72.

42) Charbotel B, Hours M, Perdrix A, Anzivino-Viricel L, Bergeret A. Respiratory function among waste incinerator workers. Int Arch Occup Environ Health. 2005; 78(1): 65- 70.

산 증가 등이 확인되었으나, 당뇨, 통풍과의 연관성은 밝히지 못하였다. 이 외에도 다이옥신의 증가가 빈혈, 담석증, 갑상성질환과의 연관성은 확인되지 않았다. 이와 유사하게 Yamamoto 등⁴⁴⁾은 소각장 근로자들의 혈중 다이옥신이 일반 일본인구집단과 차이가 없다고 평가하였지만, 당화혈색소(HbA1c)의 증가와 다이옥신의 증가는 관련성이 일부 확인되었다. 그러나 당뇨병의 유병율의 차이는 일반인구와 유의한 차이가 나타나지 않았다.

-세포 기능과 손상, 산화스트레스(Oxidative stress)

Cao 등⁴⁵⁾은 소각장 내부 실내공기에서 채취한 입자상 물질을 인간세포(A459)에 노출시킨 연구결과 활성산소종(Reactive Oxygen Species, ROS)의 증가와 세포의 생존력이 떨어지는 것을 확인하였다. Oh 등⁴⁶⁾의 연구에서, 31명의 소각장 근무자와 84명의 대조군에서 혈액검사를 한 결과, 면역반응과 관련된 T세포의 활성이 증가된 것으로 나타났다. Leem 등⁴⁷⁾은 산화 스트레스의 소변중 표지자를 이용하여 13명의 생활 폐기물 소각장 근무자, 16명의 소각장 인근지역 주민과 10명의 산업 폐기물 소각장 인근지역 주민과 비교한 결과, 산업폐기물 소각장 인근 지역 주민의 8-OHdG가 17g/g creatinine으로 유의하게 높게 나타났다.

세포수준에서의 손상을 확인하는 것이 반드시 분자생물학적으로 반드시

43) Chen HL, Su HJ, Guo YL, Liao PC, Hung CF, Lee CC. Biochemistry examinations and health disorder evaluation of Taiwanese living near incinerators and with low serum PCDD/Fs levels. *Sci Total Environ.* 2006; 366(2-3): 538- 48.

44) Yamamoto K, Kudo M, Arito H, Ogawa Y, Takata T. A cross-sectional analysis of dioxins and health effects in municipal and private waste incinerator workers in Japan. *Ind Health.* 2015; 53(5): 465- 79.

45) Cao L, Zeng J, Liu K, Bao L, Li Y. Characterization and cytotoxicity of PM<0.2, PM0.2-2.5 and PM2.5-10 around MSWI in Shanghai, China. *Int J Environ Res Public Health.* 2015; 12(5): 5076- 89.

46) Oh E, Lee E, Im H, Kang HS, Jung WW, Won NH, et al. Evaluation of immuno- and reproductive toxicities and association between immunotoxicological and genotoxicological parameters in waste incineration workers. *Toxicology.* 2005; 210(1): 65- 80.

47) Leem JH, Hong YC, Lee KH, Kwon HJ, Chang YS, Jang JY. Health survey on workers and residents near the municipal waste and industrial waste incinerators in Korea. *Ind Health.* 2003; 41(3): 181- 8.

시 특정한 결과 가져온다고 해석할 수는 없으나, 다양한 병태생리, 특히 발암성(Carcinogenicity)의 평가의 시작점으로 해석될 수 있으므로, 의미 있는 결과들이라 할 수 있다.

지속적이고 만성적인 산화스트레스는 허혈성 심질환, 암 발생의 주요한 원인으로 지목되어 왔다. Yoshida 등⁴⁸⁾의 연구에서 일본의 소각장 근로자들의 근무 기간과 소변과 혈청의 산화 스트레스의 표지자인 8-hydroxy-2'-deoxyguanosine(8-OHdG)가 올라가는 것을 확인하였다. 그러나 질병의 위험도를 증가시키는 것은 불확실한 것으로 결론지었다.

이외의 연구에서도 소각장과 관련된 다양한 건강영향에 관한 논문들 중 다수는 연관성이 뚜렷하지 않게 나타난 논문들도 다수 확인되었다<표 III-8>.

48) Yoshida R, Ogawa Y, Mori I, Nakata A, Wang R, Ueno S, et al. Associations between oxidative stress levels and total duration of engagement in jobs with exposure to fly ash among workers at municipal solid waste incinerators. *Mutagenesis*. 2003; 18(6): 533- 7.

<표 III-7> 기타질환 관련 문헌

저자	출판 년도	연구 기간	국가	소각방식	연구방법	연구 대상수	연구주제	결과
Agramunt et al	2003	1999- 2002	스페인	30,000t/년 용량의 도시 고형폐기물 소각장, 전 기집진기, 선택적 환원 촉매, 습식 스크러버	코호트연구	26	인체 내부 측정	노출과 관련된 소변 2,5-DCP의 상당한 증가
Bakoglu, Karademir & Ayberk	2004	2003	터키	2단계 연소 시스템을 사 용한 산업 및 임상 폐기 물 소각로, 전기집진기, 벤츄리 스크러버, 석회 스크러버, 활성탄	단면연구	해당 없음	인체 외부 측정	벤젠, 헥사클로로부 타딘, 1,2-디브로모 -3-클로로프로판의 국가 직업 노출 제 한 초과
Charbotel et al	2005	미상	프랑스	다양한 연식의 생활 및 병원 폐기물 소각로, 특 정 세부 사항 미상	코호트연구	159	기타 건강 효과	직업적 노출과 관련 된 폐쇄성 호흡기 질환 위험의 상당한 증가
Cao et al	2015	미상	중국	1000t/년 용량의 도시고 형폐기물 소각장과 일반 적인 소각 기술 및 가스 정화 시스템 유형	관찰연구	해당 없음	인체 내부 측정	노출과 관련된 활성 산소 생산 및 세포 독성의 상당한 증가

Oh et al	2005	2002	한국	도시고형폐기물 소각장, 특정 세부 사항 미상	단면연구	115	인체 외부 측정, 인체 내부 측정, 생식건강	DNA 손상의 유의한 증가, T 세포 활성화 및 소변 1-히드록실피렌 및 2-나프톨의 상당한 증가; 노출과 관련된 정자수와 운동성 상당한 감소
Leem et al	2003	미상	한국	다수의 도시고형폐기물 소각장, 하나의 산업 폐기물 소각로, 특정 세부 사항 미상	단면연구	39	인체 내부 측정	산업폐기물 소각장 인근 지역 주민의 8-OHdG가 17g/g creatinine으로 유의하게 높음
Yoshida et al	2003	미상	일본	도시고형폐기물 소각장, 특정 세부 사항 미상	단면연구	81	인체 내부 측정	직업적 노출과 관련된 소변 8-OHdG 수치의 상당한 증가
Cordier et al	2004	1988-1997	프랑스	다수의 도시고형폐기물 소각장, 연간 11-250,000 t의 용량 범위, 다양한 먼지 제어 및 연기 처리 사용	코호트연구	564,608	인체 외부 측정, 생식건강	노출과 관련된 안면파열, 신장 이형성증 및 폐쇄성 요로병증의 상당한 증가

Cordier et al	2010	2001-2003	프랑스	다수의 도시고형폐기물 소각장, 특정 세부 사항 미상	환자-대조군 연구	452	생식건강	노출과 관련된 선천적 요로 결함의 상당한 증가
Galise et al	2012	미상	이탈리아	도시고형폐기물 소각장/복합사이클 가스터빈 발전설비	시뮬레이션 모델 연구	해당 없음	인체 외부 측정, 기타 건강 효과	모델의 심혈관계 위험의 유의미한 증가; 유의수준 미상
Hazucha et al	2002	1992-1994	USA	다수의 도시고형폐기물 소각장, 유해 및 생의학 폐기물 소각로, 특정 세부 사항 미상	단면연구	1031	기타 건강 효과	유의미하지 않음
Hours et al	2003	1996	프랑스	다수의 도시고형폐기물 소각장, 특정 세부 사항 미상	단면연구	196	인체 내부 측정, 기타 건강 효과	노출과 관련된 피부 증상 및 폐 기능 저하의 상당한 증가
Jin et al	2012	미상	중국	다수의 도시고형폐기물 소각장, 일간 800-1,500 t의 용량 범위, 반-건식 스크러버, 백 필터, 활성탄 주입	시뮬레이션 모델 연구	해당 없음	인체 외부 측정	유의수준 미상
Kim et al	2011	미상	한국	다수의 도시고형폐기물 소각장, 특정 세부 사항 미상	시뮬레이션 모델 연구	해당 없음	기타 건강 효과	유의미하지 않음

Kirkeby et al	2006	미상	덴마크	특정 세부 사항 미상	시뮬레이션 모델 연구	해당 없음	인체 내부 측정, 인체 외부 측정	유의수준 미상
Liu et al	2013	2012	중국	1600t/일 용량의 도시고형폐기물 소각장, 화력자 용광로, 반-건식 스크러버, 활성탄 주입, 백필터	사례연구	해당 없음	인체 외부 측정	유의미하지 않음
Lonati et al	2007	미상	이탈리아	가상의 도시고형폐기물 소각장, 특정 세부 사항 미상	시뮬레이션 모델 연구	해당 없음	인체 외부 측정	소각로에서 가장 중요한 노출 경로는 음식물
Lung et al	2013	2003-2004	대만	다수의 도시고형폐기물 소각장, 특정 세부 사항 미상	코호트연구	19,908	기타 건강 효과	유의미하지 않음
Mari et al	2013	2011	스페인	유해 폐기물 소각로, 특정 세부 사항 미상	종단연구	27	인체 내부 측정	유의미하지 않음
Marti-Cid, Bocio & Domingo	2008	2006	스페인	유해 폐기물 소각로, 특정 세부 사항 미상	단면연구	해당 없음	인체 외부 측정	유의미하지 않음

Marti-Cid, Perello & Domingo	2009	2006	스페인	유해 폐기물 소각로, 특정 세부 사항 미상	단면연구	360	인체 외부 측정, 인체 내부 측정	유의미하지 않음
Meneses et al	2004	1996, 2000	스페인	1975년에 건설되고 1999년에 새로운 배기 가스 기술로 업그레이드된 도시고형폐기물 소각장, 특정 세부 사항 미상	시뮬레이션 모델 연구	해당 없음	인체 외부 측정	유의수준 미상
Miyake et al	2005	1997	일본	다수의 도시고형폐기물 소각장, 특정 세부 사항 미상	단면연구	450,807	기타 건강 효과	노출과 관련된 천명, 두통, 복통, 피로의 유병률의 상당한 증가
Moon et al	2005	2002	한국	다수의 도시고형폐기물 소각장, 특정 세부 사항 미상	단면연구	103	인체 내부 측정	유의미하지 않음
Reis et al	2007	2-year period -no exact dates	포르투갈	2개의 도시고형폐기물 소각장 (1999년, 2002년부터 운영), 특정 세부 사항 미상	단면연구	497	인체 내부 측정	유의미하지 않음

Reis et al	2007	1999-2005	포르투갈	다수의 도시고형폐기물 소각장, 특정 세부 사항 미상	코호트연구	116	인체 내부 측정	유의미하지 않음
Reis et al	2007	미상	포르투갈	다수의 도시고형폐기물 소각장, 특정 세부 사항 미상	단면연구	417	인체 내부 측정	유의미하지 않음
Reis et al	2007	1999-2003	포르투갈	다수의 도시고형폐기물 소각장, 특정 세부 사항 미상	단면연구	181	인체 외부 측정, 인체 내부 측정	유의미하지 않음
Vilavert et al	2011	2007-2009	스페인	145,000t/년 용량의 도시고형폐기물 소각장	시뮬레이션 모델 연구	해당 없음	인체 외부 측정	유의미하지 않음
Vilavert et al	2012	2009-2010	스페인	145,000t/년 용량의 도시고형폐기물 소각장	시뮬레이션 모델 연구	해당 없음	인체 외부 측정	유의미하지 않음
Vilavert et al	2014	2010-2011	스페인	도시고형폐기물 소각장, 특정 세부 사항 미상	단면연구	해당 없음	인체 외부 측정	유의미하지 않음
Wultsch et al	2011	미상	오스트리아	도시고형폐기물 소각장, 특정 세부 사항 미상	단면연구	42	인체 내부 측정	유의미하지 않음

2. 사업장별 작업환경측정 결과

조사대상 3개의 소각장에서 각각 다이옥신 1개 지점, 다환방향족탄화수소(PAHs) 2개 지점, 중금속류, 유기용제, 총분진은 4개 지점에서 작업환경측정을 실시하였다. 측정 지점은 조사자를 포함하여, 산업위생기사 2인, 소각장 근로자 대표와 예비조사, 협의를 통해 선정하였으며, 소각장의 특성과 근로자들의 작업환경에 대한 진술을 토대로 작업환경에서 노출수준이 높을 것으로 추정되고 대표성이 있는 곳, 다수의 근로자가 많은 근무시간을 보내는 곳을 우선적으로 선정하였다. 주요 측정 지점과 각 지점에 대한 설명은 연구방법에 제시하였다.

1) 다이옥신

A 소각장 소각로 상부에서 측정한 다이옥신 및 퓨란 17종의 측정결과 총 다이옥신류(PCDDs)는 $0.0859\text{pg I-TEQ/Sm}^3$, 퓨란류(PCDFs) $0.4642\text{pg I-TEQ/Sm}^3$, 총합은 $0.550\text{pg I-TEQ/Sm}^3$ 로 측정되었다. 이성체 17종의 세부 측정결과는 <표 III-8>과 같다.

<표 III-8> A 소각장 소각로 상부의 다이옥신, 퓨란류 측정결과

구분	동족체	분석결과		
		실측농도 (pg/Sm ³)	독성등가 환산계수* (I-TEF)	독성등가 환산농도** (pgI-TEQ/Sm ³)
다이옥신류 (PCDDs)	2,3,7,8-T4CDD	0.000	1	0.0000
	1,2,3,7,8-P5CDD	0.119	0.5	0.0594
	1,2,3,4,7,8-H6CDD	0.059	0.1	0.0059
	1,2,3,6,7,8-H6CDD	0.106	0.1	0.0106
	1,2,3,7,8,9-H6CDD	0.064	0.1	0.0064
	1,2,3,4,6,7,8-H7CDD	0.332	0.01	0.0033
	O8CDD	0.273	0.001	0.0003
	Total PCDDs	0.953		0.0859

퓨란류 (PCDFs)	2,3,7,8-T4CDF	0.475	0.1	0.0475
	1,2,3,7,8-P5CDF	0.397	0.05	0.0199
	2,3,4,7,8-P5CDF	0.583	0.5	0.2916
	1,2,3,4,7,8-H6CDF	0.342	0.1	0.0342
	1,2,3,6,7,8-H6CDF	0.359	0.1	0.0359
	2,3,4,6,7,8-H6CDF	0.280	0.1	0.0280
	1,2,3,7,8,9-H6CDF	0.000	0.1	0.0000
	1,2,3,4,6,7,8-H7CDF	0.634	0.01	0.0063
	1,2,3,4,7,8,9-H7CDF	0.063	0.01	0.0006
	O8CDF	0.211	0.001	0.0002
	Total PCDFs	3.344		0.4642
Total (PCDDs+PCDFs)		4.297		0.550

* I-TEF : The international toxicity equivalency factor

** 산소농도 보정농도에 독성등가계수를 적용하여 환산한 농도 (pg I-TEQ/Sm³ as 2,3,7,8-T4CDD)

다이옥신은 여러 개의 방향족 벤젠고리에 염소가 일부 또는 전체가 치환되어 있는 화합물인데, 치환 수와 위치에 따라 다이옥신은 75종, 퓨란은 135종이 존재한다. 이 중에서 대기 중, 혈중 다이옥신을 분석할 때 독성이 강하고 대표성이 있는 17종의 다이옥신류를 일반적으로 분석에 포함하는데 각 동족체의 독성강도에 따라서 상대적 비교를 위해 독성등가계수(Toxic Equivalent Factor, TEF)를 갖는다. 예를 들어, 다이옥신 중 가장 독성이 강한 2,3,7,8-Tetrachlorodibenzo-p-dioxin (2,3,7,8-TCDD)는 '1'이고 2,3,7,8-TCDF는 '0.1'이다. 이 계수를 이용하여 보정한 후 총합으로 나타낸 단위가 I-TEQ/Sm³ 이다. 이 독성등가계수는 대기 중 다이옥신의 경우 미국 EPA에서 제안한 International Toxic Equivalent Factor를 사용하고, 혈중 다이옥신 분석에는 WHO에서 제안한 WHO-TEQ를 사용한다. 각 독성등가계수는 결과표와 함께 제시하였다.

B소각장은 소규모 소각장으로 대형 소각장과 대조를 위하여 투입호퍼에서 측정을 실시하였는데, 0.008pg I-TEQ/Sm³ 로 3개의 소각장 중에서 가장 낮은 수치로 측정되었다. 각 이성체의 세부 측정결과는 <표 III-9>와 같다.

<표 III-9> B 소각장 투입호퍼의 다이옥신, 퓨란류 측정결과

구분	동족체	분석결과		
		실측농도 (pg/Sm ³)	독성등가 환산계수 (I-TEF)	독성등가 환산농도 (pgI-TEQ/Sm ³)
다이옥신류 (PCDDs)	2,3,7,8-T4CDD	0.000	1	0.0000
	1,2,3,7,8-P5CDD	0.000	0.5	0.0000
	1,2,3,4,7,8-H6CDD	0.000	0.1	0.0000
	1,2,3,6,7,8-H6CDD	0.000	0.1	0.0000
	1,2,3,7,8,9-H6CDD	0.000	0.1	0.0000
	1,2,3,4,6,7,8-H7CDD	0.104	0.01	0.0010
	O8CDD	0.154	0.001	0.0002
	Total PCDDs	0.258		0.0012
퓨란류 (PCDFs)	2,3,7,8-T4CDF	0.000	0.1	0.0000
	1,2,3,7,8-P5CDF	0.007	0.05	0.0003
	2,3,4,7,8-P5CDF	0.012	0.5	0.0061
	1,2,3,4,7,8-H6CDF	0.000	0.1	0.0000
	1,2,3,6,7,8-H6CDF	0.000	0.1	0.0000
	2,3,4,6,7,8-H6CDF	0.000	0.1	0.0000
	1,2,3,7,8,9-H6CDF	0.000	0.1	0.0000
	1,2,3,4,6,7,8-H7CDF	0.051	0.01	0.0005
	1,2,3,4,7,8,9-H7CDF	0.000	0.01	0.0000
	O8CDF	0.068	0.001	0.0001
	Total PCDFs	0.139		0.0070
Total (PCDDs+ PCDFs)		0.397		0.008

C 소각장의 소각로 상부에서 측정한 다이옥신 및 퓨란 17종의 측정결과 총 다이옥신류(PCDDs)는 0.2892pg I-TEQ/Sm³, 퓨란류(PCDFs) 0.6998pg I-TEQ/Sm³, 총합은 0.989 pg I-TEQ/Sm³ 로, 조사 대상 소각장 중 가장 높은 결과를 보였다. 동족체별 세부 측정결과는 <표 III-10>과 같다.

<표 III-10> C 소각장 소각로 상부의 다이옥신, 퓨란류 측정결과

구분	동족체	분석결과		
		실측농도 (pg/Sm ³)	독성등가 환산계수 (I-TEF)	독성등가 환산농도 (pgI-TEQ/Sm ³)
다이옥신류 (PCDDs)	2,3,7,8-T4CDD	0.056	1	0.0562
	1,2,3,7,8-P5CDD	0.263	0.5	0.1313
	1,2,3,4,7,8-H6CDD	0.208	0.1	0.0208
	1,2,3,6,7,8-H6CDD	0.385	0.1	0.0385
	1,2,3,7,8,9-H6CDD	0.246	0.1	0.0246
	1,2,3,4,6,7,8-H7CDD	1.647	0.01	0.0165
	O8CDD	1.281	0.001	0.0013
	Total PCDDs	4.087		0.2892
퓨란류 (PCDFs)	2,3,7,8-T4CDF	0.391	0.1	0.0391
	1,2,3,7,8-P5CDF	0.421	0.05	0.0211
	2,3,4,7,8-P5CDF	0.868	0.5	0.4340
	1,2,3,4,7,8-H6CDF	0.589	0.1	0.0589
	1,2,3,6,7,8-H6CDF	0.630	0.1	0.0630
	2,3,4,6,7,8-H6CDF	0.669	0.1	0.0669
	1,2,3,7,8,9-H6CDF	0.000	0.1	0.0000
	1,2,3,4,6,7,8-H7CDF	1.393	0.01	0.0139
	1,2,3,4,7,8,9-H7CDF	0.222	0.01	0.0022
	O8CDF	0.673	0.001	0.0007
	Total PCDFs	5.856		0.6998
Total (PCDDs+ PCDFs)		9.943		0.989

과거 2007년 구정완 등⁴⁹⁾의 연구에서 10개 소각장을 대상으로 실시한 기증 다이옥신 측정값은 $0.2024-47.7629\text{pg I-TEQ/Sm}^3$ 의 넓은 분포를 보였다. 이번 연구에서 3개의 소각장의 다이옥신 측정값은 $0.008 - 0.989\text{pg I-TEQ/Sm}^3$ 로 과거 연구와 비슷하거나 다소 낮은 측정값으로 측정되었으나, 잔류성오염물질 관리법 시행령의 환경기준인 0.6pg I-TEQ/Sm^3 에 육박하거나, 초과하는 수치를 보인 사업장이 3개의 소각장 중 2개소로 나타났다.

2) 다환방향족탄화수소(PAHs)

각 소각장별로 2개 지점에서 PAHs의 측정을 실시하였다. A 소각장에서는 일부 항목의 차이는 있으나 전체적으로 소각로 상부의 PAHs 농도가 바닥재 집결지보다 높게 나타나는 경향을 보였다. 전체 PAHs 중에서 나프탈렌의 비율이 가장 높게 나왔는데, 이는 과거 연구에서도 유사한 경향을 보였다. 일부 연구에서는 전체 PAHs를 제시할 때 나프탈렌을 제외한 값을 제시하기도 하였으나, 본 연구에서는 총합에 포함시켜 제시하였다.

49) 구정완 등, 산업폐기물 소각장 근로자의 건강상태와 직업적 요인의 관련성 연구, 산업안전보건연구원(2007)

<표 III-11> A 소각장 소각로 상부의 PAHs 측정결과

측정 항목	영문명	결과	단위
벤조(a)피렌	Benzo[a]pyrene	검출한계미만	ng/Sm ³
플루오렌	Fluorene	33.39	ng/Sm ³
페난트렌	Phenanthrene	114.75	ng/Sm ³
안트라센	Anthracene	1.89	ng/Sm ³
플루오란텐	Fluoranthene	8.30	ng/Sm ³
피렌	Pyrene	7.54	ng/Sm ³
나프탈렌	Naphthalene	442.34	ng/Sm ³
아세나프틸렌	Acenaphthylene	검출한계미만	ng/Sm ³
아세나프텐	Acenaphthene	검출한계미만	ng/Sm ³
벤조(a)안트라센	Benz[a]anthracene	0.59	ng/Sm ³
크라이센	Chrysene	0.78	ng/Sm ³
벤조(b)플루오란텐	Benzo[b]fluoranthene	0.85	ng/Sm ³
벤조(k)플루오란텐	Benzo[k]fluoranthene	0.37	ng/Sm ³
인데노피렌	Indenpyrene	1.12	ng/Sm ³
다이벤조(a,h)안트라센	Dibenz[a,h]anthracene	검출한계미만	ng/Sm ³
벤조(g,h,i)페릴렌	Benzo[g,h,i]perylene	1.07	ng/Sm ³
ΣPAHs		612.99	ng/Sm ³

<표 III-12> A 소각장 바닥재 집결지의 PAHs 측정결과

측정항목	영문명	결과	단위
벤조(a)피렌	Benzo[a]pyrene	검출한계미만	ng/Sm ³
플루오렌	Fluorene	29.42	ng/Sm ³
페난트렌	Phenanthrene	58.36	ng/Sm ³
안트라센	Anthracene	2.76	ng/Sm ³
플루오란텐	Fluoranthene	3.05	ng/Sm ³
피렌	Pyrene	3.64	ng/Sm ³
나프탈렌	Naphthalene	551.25	ng/Sm ³
아세나프틸렌	Acenaphthylene	검출한계미만	ng/Sm ³
아세나프텐	Acenaphthene	검출한계미만	ng/Sm ³
벤조(a)안트라센	Benz[a]anthracene	0.15	ng/Sm ³
크라이센	Chrysene	0.16	ng/Sm ³
벤조(b)플루오란텐	Benzo[b]fluoranthene	0.25	ng/Sm ³
벤조(k)플루오란텐	Benzo[k]fluoranthene	0.11	ng/Sm ³
인데노피렌	Indenpyrene	0.11	ng/Sm ³
다이벤조(a,h)안트라센	Dibenz[a,h]anthracene	검출한계미만	ng/Sm ³
벤조(g,h,i)퍼릴렌	Benzo[g,h,i]perylene	검출한계미만	ng/Sm ³
ΣPAHs		649.26	ng/Sm ³

B 소각장의 투입 호퍼, 바닥재 집결지 2개 지점에서 PAHs의 측정을 실시하였다. B소각장은 조사한 소각장 중 일일 처리량이 가장 적은 소규모의 소각장으로 대부분의 PAH가 검출한계미만으로 나타났고, 총 PAHs도 가장 낮은 수준으로 확인되었다.

<표 III-13> B 소각장 투입 호퍼의 PAHs 측정결과

측정항목	영문명	결과	단위
벤조(a)피렌	Benzo[a]pyrene	검출한계미만	ng/Sm ³
플루오렌	Fluorene	4.21	ng/Sm ³
페난트렌	Phenanthrene	1.55	ng/Sm ³
안트라센	Anthracene	검출한계미만	ng/Sm ³
플루오란텐	Fluoranthene	0.5	ng/Sm ³
피렌	Pyrene	0.46	ng/Sm ³
나프탈렌	Naphthalene	590.94	ng/Sm ³
아세나프틸렌	Acenaphthylene	검출한계미만	ng/Sm ³
아세나프텐	Acenaphthene	검출한계미만	ng/Sm ³
벤조(a)안트라센	Benz[a]anthracene	검출한계미만	ng/Sm ³
크라이센	Chrysene	0.08	ng/Sm ³
벤조(b)플루오란텐	Benzo[b]fluoranthene	검출한계미만	ng/Sm ³
벤조(k)플루오란텐	Benzo[k]fluoranthene	검출한계미만	ng/Sm ³
인데노피렌	Indenpyrene	검출한계미만	ng/Sm ³
다이벤조(a,h)안트라센	Dibenz[a,h]anthracene	검출한계미만	ng/Sm ³
벤조(g,h,i)퍼릴렌	Benzo[g,h,i]perylene	검출한계미만	ng/Sm ³
ΣPAHs		597.74	ng/Sm ³

<표 III-14> B 소각장 바닥재 집결지의 PAHs 측정결과

측정 항목	영문 명	결 과	단 위
벤조(a)피렌	Benzo[a]pyrene	검출한계미만	ng/Sm ³
플루오렌	Fluorene	3.97	ng/Sm ³
페난트렌	Phenanthrene	3.18	ng/Sm ³
안트라센	Anthracene	0.35	ng/Sm ³
플루오란텐	Fluoranthene	2.21	ng/Sm ³
피렌	Pyrene	2.08	ng/Sm ³
나프탈렌	Naphthalene	40.0	ng/Sm ³
아세나프틸렌	Acenaphthylene	검출한계미만	ng/Sm ³
아세나프텐	Acenaphthene	1.94	ng/Sm ³
벤조(a)안트라센	Benz[a]anthracene	0.05	ng/Sm ³
크라이센	Chrysene	0.12	ng/Sm ³
벤조(b)플루오란텐	Benzo[b]fluoranthene	검출한계미만	ng/Sm ³
벤조(k)플루오란텐	Benzo[k]fluoranthene	검출한계미만	ng/Sm ³
인데노피렌	Indenpyrene	검출한계미만	ng/Sm ³
다이벤조(a,h)안트라센	Dibenz[a,h]anthracene	검출한계미만	ng/Sm ³
벤조(g,h,i)퍼릴렌	Benzo[g,h,i]perylene	검출한계미만	ng/Sm ³
ΣPAHs		53.9	ng/Sm ³

C소각장에서는 소각로 상부, 바닥재 집결지에서 측정을 하였다. 전체 총 PAHs는 바닥재 집결지에서 247.45 ng/Sm³, 소각로 상부에서 681.11ng/Sm³ 로, 소각로 상부에서 더 높게 측정되었다. C 소각장의 소각로 상부는 측정대상 소각지점 중 가장 높은 결과를 보였다. 특히 벤조(a)피렌이 다른 소각장에서는 검출한계 미만으로 나타났으나, C소각장에서는 소각로 상부에서 5.37ng/Sm³, 바닥재 집결지에서 0.16ng/Sm³으로 검출되었다. 다이벤조(a,h)안트라센은 각각 1.72, 0.55ng/Sm³ 으로 측정되었다.

<표 III-15> C 속장 소각로 상부의 PAHs 측정결과

측정항목	영문명	결과	단위
벤조(a)피렌	Benzo[a]pyrene	5.37	ng/Sm ³
플루오렌	Fluorene	22.73	ng/Sm ³
페난트렌	Phenanthrene	14.11	ng/Sm ³
안트라센	Anthracene	0.69	ng/Sm ³
플루오란텐	Fluoranthene	7.57	ng/Sm ³
피렌	Pyrene	10.57	ng/Sm ³
나프탈렌	Naphthalene	545.61	ng/Sm ³
아세나프틸렌	Acenaphthylene	38.21	ng/Sm ³
아세나프텐	Acenaphthene	6.85	ng/Sm ³
벤조(a)안트라센	Benz[a]anthracene	1.8	ng/Sm ³
크라이센	Chrysene	5.82	ng/Sm ³
벤조(b)플루오란텐	Benzo[b]fluoranthene	3.27	ng/Sm ³
벤조(k)플루오란텐	Benzo[k]fluoranthene	1.28	ng/Sm ³
인데노피렌	Indenpyrene	5.91	ng/Sm ³
다이벤조(a,h)안트라센	Dibenz[a,h]anthracene	1.72	ng/Sm ³
벤조(g,h,i)퍼릴렌	Benzo[g,h,i]perylene	9.6	ng/Sm ³
ΣPAHs		681.11	ng/Sm ³

<표 III-16> C 소각장 바닥재 집결지의 PAHs 측정결과

측정항목	영문명	결과	단위
벤조(a)피렌	Benzo[a]pyrene	0.16	ng/Sm ³
플루오렌	Fluorene	6.85	ng/Sm ³
페난트렌	Phenanthrene	3.17	ng/Sm ³
안트라센	Anthracene	0.26	ng/Sm ³
플루오란텐	Fluoranthene	2.27	ng/Sm ³
피렌	Pyrene	2.18	ng/Sm ³
나프탈렌	Naphthalene	218.14	ng/Sm ³
아세나프틸렌	Acenaphthylene	4.29	ng/Sm ³
아세나프텐	Acenaphthene	3.79	ng/Sm ³
벤조(a)안트라센	Benz[a]anthracene	0.17	ng/Sm ³
크라이센	Chrysene	0.47	ng/Sm ³
벤조(b)플루오란텐	Benzo[b]fluoranthene	0.31	ng/Sm ³
벤조(k)플루오란텐	Benzo[k]fluoranthene	0.15	ng/Sm ³
인데노피렌	Indenpyrene	2.8	ng/Sm ³
다이벤조(a,h)안트라센	Dibenz[a,h]anthracene	0.55	ng/Sm ³
벤조(g,h,i)퍼릴렌	Benzo[g,h,i]perylene	1.89	ng/Sm ³
ΣPAHs		247.45	ng/Sm ³

3) 중금속

A 소각장에서는 바닥재 집결지, 소각로 하부, 재크레인실 내부, 소각로 상부에서 중금속 농도를 측정하였다. 4곳의 측정지점 중 소각장 상부에서 가장 높은 수준의 중금속 측정 결과가 확인되었으나, 모든 측정 금속이 노출기준의 1% 수준으로 낮게 측정되었다.

<표 III-17> A 소각장 중금속 측정 결과

중금속	결과(mg/m ³)				노출기준 (mg/m ³)
	바닥재 집결지	소각로 하부	재크레인실 내부	소각로 상부 (보일러)	
Pb	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.05
Cd	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.01
ZnO	0.0007	0.0015	0.0000	0.0063	2
Cu	0.0000	0.0000	0.0000	0.0006	1
Fe ₂ O ₃	0.0065	0.0019	0.0006	0.0080	5
Mn	0.0001	0.0002	0.0000	0.0008	1
Cr	0.0002	0.0002	0.0002	0.0004	0.5
Ni	0.0001	0.0000	0.0000	0.0001	1
MgO	0.0024	0.0063	0.0000	0.0330	10
Al ₂ O ₃	0.0150	0.0045	0.0011	0.0265	10

B 소각장에서는 제어실, 투입 호퍼, 소각로 상부, 바닥재 집결지에서 중금속을 측정하였고, C 소각장에서는 소각로 상부, 투입 호퍼, 반응탑 상부, 재추출기에서 측정을 하였다. A 소각장과 유사하게 두 소각장의 모든 측정 중금속 결과에서 노출기준 미만으로 확인되었다.

<표 III-18> B 소각장 중금속 측정 결과

중금속	결과(mg/m ³)				노출기준 (mg/m ³)
	제어실	투입 호퍼	소각로 상부	바닥재 집결지	
Pb	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.05
Cd	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.01
ZnO	0.0000	0.0003	0.0005	0.0002	2
Cu	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1
Fe ₂ O ₃	0.0005	0.0065	0.0017	0.0021	5
Mn	0.0000	0.0002	0.0001	0.0000	1
Cr	0.0002	0.0002	0.0002	0.0003	0.5
Ni	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1
MgO	0.0000	0.0034	0.0022	0.0015	10
Al ₂ O ₃	0.0005	0.0046	0.0023	0.0017	10

<표 III-19> C 소각장 중금속 측정 결과

중금속	결과(mg/m ³)				노출기준 (mg/m ³)
	소각로 상부	투입 호퍼	반응탑 상부	재추출기	
Pb	0.0000	0.0002	0.0001	0.0000	0.05
Cd	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.01
ZnO	0.0004	0.0008	0.0006	0.0001	2
Cu	0.0000	0.0001	0.0000	0.0000	1
Fe ₂ O ₃	0.0015	0.0039	0.0009	0.0012	5
Mn	0.0000	0.0001	0.0000	0.0000	1
Cr	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.5
Ni	0.0000	0.0001	0.0001	0.0000	1
MgO	0.0005	0.0013	0.0007	0.0004	10
Al ₂ O ₃	0.0014	0.0043	0.0009	0.0012	10

4) 유기용제

각 소각장의 단위작업 장소별 벤젠, 톨루엔, 크실렌의 측정결과 일부 지점에서 극미량의 유기용제가 측정이 되었고, 대부분은 측정한계 미만으로 분석되었다. 일부 지점에서 톨루엔과 크실렌이 검출이 되었고, 과거 연구에서 언급이 되었던 벤젠은 검출되지 않았다.

<표 III-20> A 소각장 측정 장소별 유기용제 측정결과

단위작업장소	포집시간 (min)	유속 (L/min)	총유량(L)	측정인자	분석결과 (ppm)	노출기준 (ppm)
바닥재 저장조	360	0.1520	54.72	벤젠	N.D	0.5
				톨루엔	N.D	50
				크실렌	N.D	100
소각로 하부	361	0.1544	55.7384	벤젠	N.D	0.5
				톨루엔	N.D	50
				크실렌	N.D	100
제크레인실 내부	360	0.1515	54.54	벤젠	N.D	0.5
				톨루엔	0.0027	50
				크실렌	N.D	100
보일러 호퍼	360	0.1504	54.144	벤젠	N.D	0.5
				톨루엔	N.D	50
				크실렌	N.D	100

<표 III-21> B 소각장 측정 장소별 유기용제 측정결과

단위작업장소	포집시간 (min)	유속 (L/min)	총유량(L)	측정인자	분석결과 (ppm)	노출기준 (ppm)
투입호퍼	362	0.1527	55.2774	벤젠	N.D	0.5
				톨루엔	0.0342	50
				크실렌	0.0122	100
소각로 상부	362	0.1508	54.5896	벤젠	N.D	0.5
				톨루엔	N.D	50
				크실렌	N.D	100
제어실	363	0.1509	54.7767	벤젠	N.D	0.5
				톨루엔	N.D	50
				크실렌	N.D	100
바닥재 집결지	362	0.1537	55.6394	벤젠	N.D	0.5
				톨루엔	N.D	50
				크실렌	N.D	100

<표 III-22> C 소각장 측정 장소별 유기용제 측정결과

단위작업장소	포집시간 (min)	유속 (L/min)	총유량(L)	측정인자	분석결과 (ppm)	노출기준 (ppm)
3호기 소각로상부	361	0.1505	54.3305	벤젠	N.D	0.5
				톨루엔	N.D	50
				크실렌	N.D	100
투입 호퍼	362	0.1519	54.9878	벤젠	N.D	0.5
				톨루엔	0.2091	50
				크실렌	0.0791	100
반건식 반응탑 상부	361	0.1505	54.3305	벤젠	N.D	0.5
				톨루엔	N.D	50
				크실렌	N.D	100
1-2호기 사이 재추출기	361	0.1525	55.0525	벤젠	N.D	0.5
				톨루엔	N.D	50
				크실렌	N.D	100

5) 분진

각 소각장의 분진 측정결과, 지점별 총분진으로 <표 III-23>과 같이 측정되었다. 측정 지점 모두에서 총분진은 노출기준 10% 미만 수준으로 측정되었다. 실내 사무실과 유사한 환경이 제어실이 가장 낮은 수치를 보였으나, 폐기물이 직접 투입되는 호퍼부분, 소각로 상부, 하부, 바닥재 부분이 다른 지점보다 높은 수준으로 측정되었으나, 역시 노출기준 미만으로 확인되었다.

<표 III-23> 소각장별, 측정 장소별 총분진 측정결과

소각장	단위작업장소	포집시간 (min)	유속 (L/min)	총유량(L)	분석결과 (mg/m ³)	노출기준 (mg/m ³)
A	바닥재 저장조	360	2.1231	764.3160	0.5103	10
	소각로 하부	361	2.0975	757.1975	0.6490	10
	체크레인실 내부	360	2.1195	763.0200	0.2097	10
	보일러 호퍼	360	2.0745	746.8200	0.2009	10
B	제어실	363	2.119	769.1970	0.0371	10
	투입 호퍼	362	2.1001	760.2362	0.2972	10
	소각로 상부	362	2.017	730.1540	0.1778	10
	바닥재 집결지	362	2.121	767.8020	0.1297	10
C	3호기 소각로 상부	361	2.1312	769.3632	0.5459	10
	투입 호퍼	362	2.1763	787.8206	0.8885	10
	반건식 반응탑 상부	361	2.1247	767.0167	0.1304	10
	1-2호기 사이 채추출기	361	2.0424	737.3064	0.1224	10

6) 작업장 내 온도

본 연구의 계획에서는 고열작업에 대한 평가는 계획하지 않았으나, 소각장 내부 사전조사 과정 중, 일부 근로자에게서 고열작업에 해당되는 온도에 노출이 확인이 되어 간이로 평가를 실시하였다.

소각장의 내부 시설은 소각로가 24시간 가동되는 환경으로 내부 온도가 일반 온도계로 50℃ 이상 측정되기도 하였다. C 소각장의 반건식 반응탑에서 WBGT를 사용하여 작업장 내 온도를 측정하였고, 측정 후 약 5분이 경과하지 않은 시점에서 36.2℃로 측정되었다. 이는 고열작업 관리 지침상 경작업 수준의 업무에도 매시간 25% 작업, 75% 휴식이 필요한 것으로 평가된다.

<표 III-24> 고온작업의 작업별 노출기준, 휴식시간비

작업휴식시간비	작업강도		
	경작업	중등작업	중작업
계속작업	30.0℃	26.7℃	25.0℃
매시간 75% 작업, 25% 휴식	30.6℃	28.0℃	25.9℃
매시간 50% 작업, 50% 휴식	31.4℃	29.4℃	27.9℃
매시간 25% 작업, 75% 휴식	32.2℃	31.1℃	30.0℃

경작업 : 200 kcal/hr까지의 열량이 소요되는 작업을 말하며 앉아서 또는 서서 기계의 조정을 하기 위하여 손 또는 팔을 가볍게 쓰는 일 등을 뜻함.

중등작업 : 200-350 kcal/hr까지의 열량이 소요되는 작업을 말하며 물체를 들거나 밀면서 걸어 다니는 일 등을 뜻함.

중작업 : 350-500 kcal/hr까지의 열량이 소요되는 작업을 말하며 곡괭이질 또는 삽질하는 일 등을 뜻함.



[그림 III-1] 반건식 반응탑의 WBGT 측정(36.2℃)

3. 설문조사를 통한 근로환경 및 인식도 조사

1) 조사 대상 근로자의 일반적 특성

소각장 근무자들의 일반적 특성을 확인하기 위해 2021년 6월에서 8월 기간 동안 조사대상 소각장에서 설문조사와 생체시료(소변)검사에 동의한 근로자를 모집하였다. A 소각장 27명, B 소각장 17명, C 소각장 24명, 3개의 소각장 근무자 68명을 대상으로 설문조사와 함께 소변시료 채취를 실시하였다. 소변시료는 작업 중에 채취하였고, 개인정보수집 및 연구참여에 대한 동의를 받은 후 설문을 진행하였으며 본인의 의사에 따라 각 항목별로 응답을 거부할 경우 미응답으로 처리하였다. 결과의 비교를 위해 대조군으로서 국민건강영양조사의 결과, 또는 구정완 등⁵⁰⁾의 연구결과와 비교하였다.

소각장 근무자 중 59명(86.8%)는 남성, 8명(11.8%)은 여성으로 남

50) 구정완 등, 산업폐기물 소각장 근로자의 건강상태와 직업적 요인의 관련성 연구, 산업안전보건연구원(2007)

성의 비중이 높았다. 연령대는 40대가 20명(29.4%)로 가장 많았으며 50대, 30대, 60대 순이었다. 월 가구소득은 200-300만원으로 응답한 사람이 43명(63.2%)로 가장 많았다. 흡연율은 26명(38.2%)로 보건복지부에서 발표한 대한민국 평균흡연율(2019년 21.5%, 2018년 22.4%)⁵¹⁾에 비해서는 높았으며, 남성의 비율이 많은 것을 감안하더라도 대한민국 남성 평균 흡연율(2019년 35.7%, 2018년 36.7%)에 비해 높았다.

<표 III-25> 조사 대상 근로자의 일반 특성

변수	구분	명 (%)
성별	남성	59 (86.8%)
	여성	8 (11.8%)
	미응답	1 (1.5%)
연령대	20대	7 (10.3%)
	30대	12 (17.6%)
	40대	20 (29.4%)
	50대	11 (16.2%)
	60대	10 (14.7%)
	미응답	8 (11.8%)
결혼여부	미혼	26 (38.2%)
	기혼	36 (52.9%)
	기타 (사별, 이혼 등)	3 (4.4%)
	미응답	3 (4.4%)
학력	고졸	22 (32.4%)
	대학교졸	39 (57.4%)
	대학원졸	5 (7.4%)
	미응답	2 (2.9%)
월가구소득	200만원미만	5 (7.4%)
	200-300만원	43 (63.2%)
	300-400만원	10 (14.7%)
	400-500만원	2 (2.9%)
	500-600만원	6 (8.8%)
	600-700만원	1 (1.5%)
	미응답	1 (1.5%)

51) <https://www.index.go.kr/unify/idx-info.do?idxCd=4237>

흡연여부	과거 흡연	21 (30.9%)
	미응답	1 (1.5%)
	비흡연	20 (29.4%)
	현재 흡연중	26 (38.2%)
음주빈도	1년간 금주	16 (23.5%)
	한달에 1번미만	11 (16.2%)
	한달에 2-4번	17 (25%)
	한달에 1번정도	4 (5.9%)
	일주일에 2-3번	17 (25.0%)
	거의매일	2 (2.9%)
	미응답	1 (1.5%)

2) 근무자 작업관련 특성 및 작업관련 인지도

조사 대상 근무자 중 공무/정비 부서 인원이 15명(22.1%)로 가장 많았고, 현장직이 13명(19.2%)로 그 뒤를 이었다. 근무기간은 10년 미만이 40명(58.8%)으로 가장 많았고, 10년 이상 20년 미만이 19명(27.9%)로 그 다음이었다.

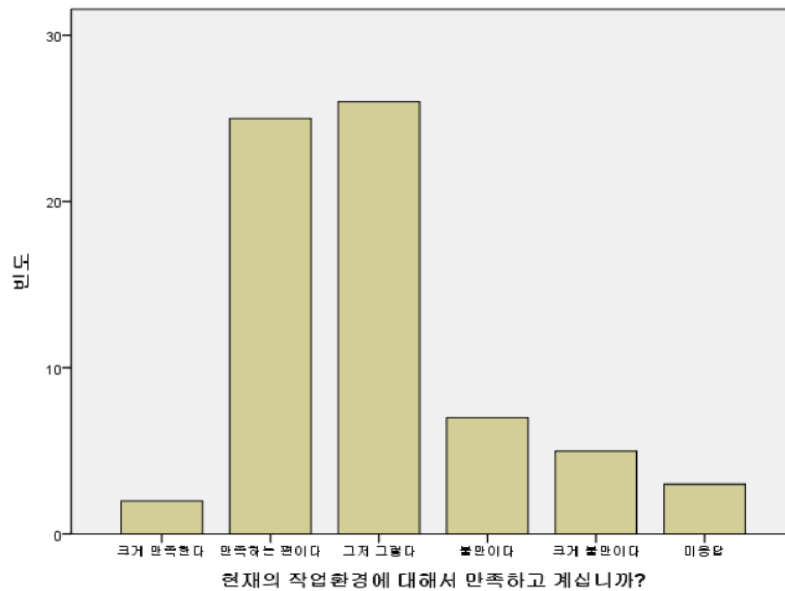
<표 III-26> 조사 대상 근로자의 부서 근무기간 및 설문조사

근무부서	
현장직	13 (19.1%)
크레인실	6 (8.8%)
재활용 선별	2 (2.9%)
공무/정비	15 (22.1%)
제어실	9 (13.2%)
사무직	8 (11.8%)
기타	9 (13.2%)
미응답	6 (8.8%)
근무기간 (년)	
0-9	40 (58.8%)
10-19	19 (27.9%)

20-29	5 (7.4%)
30년 이상	1 (1.5%)
미응답	3 (4.4%)
현재의 작업환경에 대해서 만족하고 계십니까?	
크게 만족한다	2 (2.9%)
만족하는 편이다	25 (36.8%)
그저 그렇다	26 (38.2%)
불만이다	7 (10.3%)
크게 불만이다	5 (7.4%)
미응답	3 (4.4%)
소각시설의 안전성에 대하여 어떻게 생각하십니까?	
매우 신뢰	1 (1.5%)
조금 신뢰	8 (11.8%)
보통	27 (39.7%)
조금 신뢰하지 않는다	15 (22.1%)
매우 신뢰하지 않는다	9 (13.2%)
잘 모르겠다	5 (7.4%)
미응답	3 (4.4%)
귀사의 사업주는 근로자의 건강장해 예방 및 작업 환경개선에 대한 관심도가 어느 정도라고 생각하십니까?	
매우 낮은 편이다	9 (13.2%)
낮은 편이다	8 (11.8%)
보통이다	37 (54.4%)
높은 편이다	10 (14.7%)
매우 높은 편이다	2 (2.9%)
미응답	2 (2.9%)
귀하는 업무 중 발생하는 유해물질 및 작업환경에 관해 안전보건교육을 받은 적이 있습니까?	
1년 1회 받는다	18 (26.5%)
2-3년에 한번 받는다	1 (1.5%)

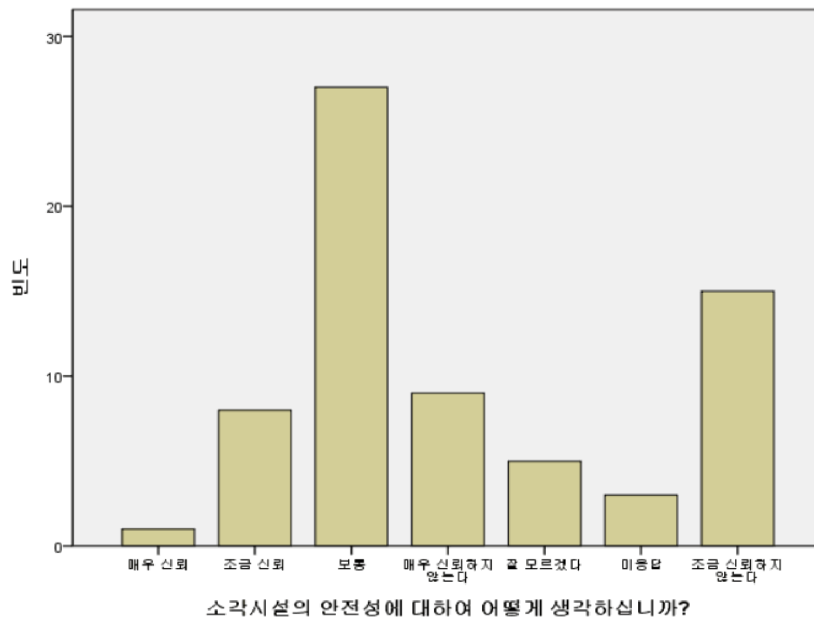
미응답	2 (2.9%)
받은 적이 없다	6 (8.8%)
월 1회 이상 받는다	41 (60.3%)
귀하는 귀사에서 발생하는 유해물질에 대해 어느 정도 알고 있다고 생각합니까?	
거의 모른다	2 (2.9%)
모르는 편이다	12 (17.6%)
아주 잘 알고 있다	4 (5.9%)
어느 정도는 알고 있다	48 (70.6%)
미응답	2 (2.9%)
소각장에서 가장 유해하거나 힘든 요인을 적어주십시오.(복수응답)	
냄새, 악취	52 (76.5%)
분진	50 (73.5%)
근골격계	36 (52.9%)
심리적 요인	7 (10.3%)

작업환경의 만족도를 묻는 설문에서 27명(39.7%)의 근로자가 작업환경에 매우만족 또는 만족한다는 답변을 하였다. 그러나, 26명(38.2%)의 근로자는 ‘그저 그렇다’ 라고 답변하였고 12명(17.7%)에서는 불만족 또는 매우 불만족의 답변을 보였다. 같은 문항으로 2007년도에 타 소각장의 근로자들을 대상으로 실시한 조사에서는 만족한다는 답변이 42.5%, 그저 그렇다 라는 답변이 46.7%, 불만족의 답변은 10.6%인 것과 비교하면 근로자들의 근무환경 만족도는 과거에 비해 떨어지는 것으로 해석된다.



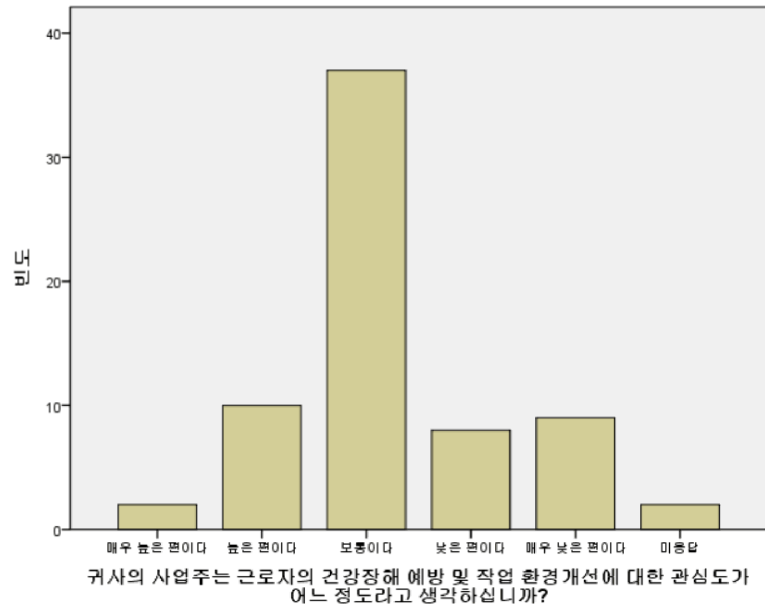
[그림 III-2] 근무환경 만족도

소각시설의 안정성을 묻는 설문에는 9명(12.4%)의 근로자만이 매우 신뢰, 또는 신뢰의 의견을 보였고 24명(25.3%)에서 조금, 또는 신뢰하지 않는다는 답변을 하였다. 이 조사 결과 역시 2007년에는 39.4%에서 신뢰의 의견을 보였고 13.4%에서 신뢰하지 않는다는 결과에 비하면 이번 조사 대상의 근로자들은 과거 조사 대상 근로자들에 비해 소각시설의 안정성에 대해 신뢰하지 않는 경향을 보였다.

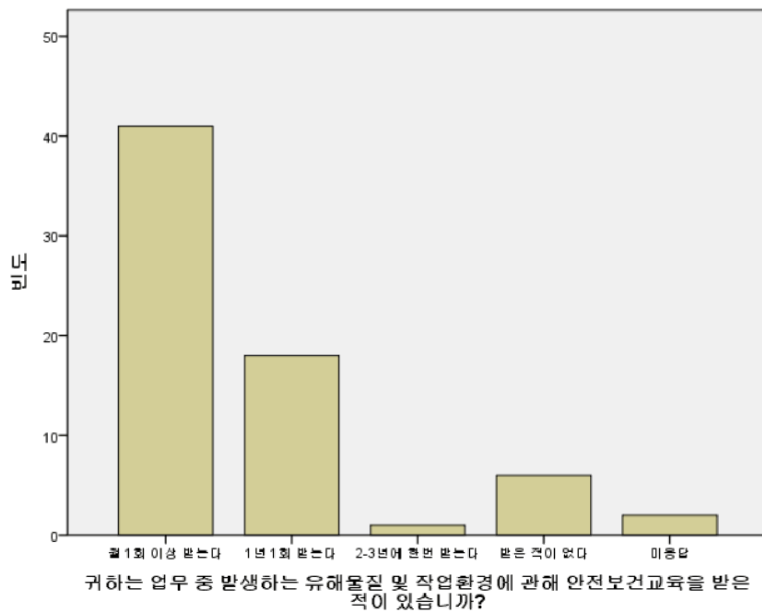


[그림 III-3] 소각시설의 안정성 인식도

사업주의 근로자 건강장해 예방, 작업환경 개선에 대한 의견에 대한 설문에는 17명(25%)에서 낮은 편이라는 의견을 보였고, 49명(72.1%)에서 보통 이상의 긍정적인 의견을 보여, 과거에 50%의 소각장에서 작업환경 측정, 특수건강진단을 실시조차 하지 않는 상황에 비해 소각장의 작업환경 개선에 대한 노력이 나아지고 있음을 간접적으로 확인할 수 있었다. 또한, 유해물질, 작업환경에 대한 안전보건교육의 실시 여부를 묻는 설문에는 41명(60.3%)의 근로자가 월 1회 이상 실시한다고 답변하여, 근로자의 교육실시 현황은 비교적 양호한 것으로 평가되었다. 유해인자에 대한 인지수준에 대한 자기 평가를 묻는 설문에서는 52명(76.5%)에서 어느정도 이상 알고 있다고 답하여, 작업환경에서 노출되거나 취급물질에 대한 이해수준은 높은 편으로 조사되었다.

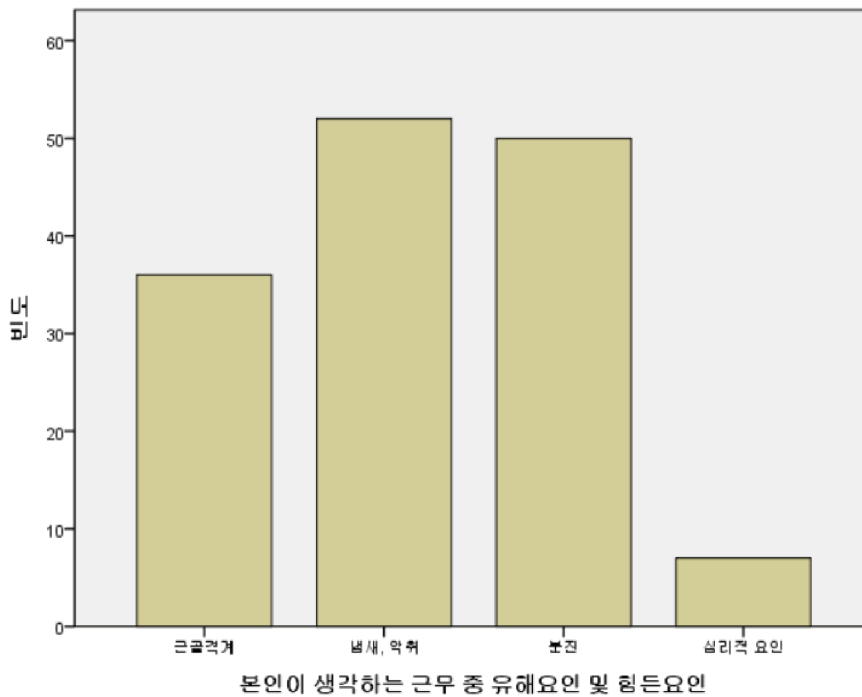


[그림 III-4] 사업주의 작업환경개선 관심도



[그림 III-5] 안전보건교육 실시 현황

마지막으로 사업장에서 노출되는 유해인자에 대해 중복으로 설문지를 제시한 결과, 52명(76.5%)의 가장 많은 응답자를 보인 인자는 ‘냄새, 악취’로 나타났다. 50명(73.5%)에서 ‘분진’을 답하였고 36명(52.9%)에서 근골격계에 대한 유해요인을 언급하였다.



[그림 III-6] 소각장 근무환경에서의 주관적 유해요인

3) PHQ-9을 이용한 우울 수준 평가

PHQ-9 설문지는 일차 건강관리시 정신건강을 평가하기 위해 개발된 것으로 한국어판으로 번안되어서 우울증의 선별검사에 널리 사용되는 설문지이다. 총 9개의 설문 문항에 대해 평가하여 각 0-3점을 부여하여 문항의 합으로 점수를 산출하여 평가에 사용하였다. 본 연구에서는 0-4점을 ‘우울증 아님’, 5-9점을 ‘가벼운 우울증’, 10-19점을 ‘중간정도 우울증’, 20점 이상을 ‘심한 우울증’으로 분류하였다. 분석결과 전체 근로자의 PHQ-9 점수는 3.30으로 나타났고, 2018년 지역사회건강조사에서 서울시 평균 2.04, 전국평균 2.20에 비하면 높게 나타났다. 또한, 조사 대상 근로자 중 5명(7.4%)에서 PHQ-9 10점 이상의 우울 위험군으로 확인되었다. 2018년 일반인구를 대상으로 한 국민건강영양조사에서 우울지수 위험군이 5.6%인 것과 비교해 높은 수준을 보였다. 근무기간으로 나누어 분석해 보았을 때 우울수준에 영향을 주는 유의한 요인은 없었다.

<표 III-27> 조사 대상 근로자의 우울수준(PHQ-9)

PHQ-9 점수 (평가)	명(%)	근무기간			
		10년미만	10-19년	20-29년	30년이상
0-4점 (우울증 아님)	43 (63.2%)	27 (67.5%)	10 (52.6%)	5 (100%)	1 (100%)
5-9점 (가벼운 우울증)	16 (23.5%)	9 (22.5%)	7 (36.8%)	0 (0%)	0 (0%)
10-19 (중간정도 우울증)	4 (5.9%)	2 (5%)	2 (10.5%)	0 (0%)	0 (0%)
20점 이상 (심한 우울증)	1 (1.5%)	1 (2.5%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
미응답	4 (5.9%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)

4. 근로자 생체시료 분석 결과

소각장별 A 소각장 27명, B 소각장 16명, C 소각장 25명, 3개의 소각장 근무자 68명에서 요중 PAH 대사산물, 프탈레이트, 8-OHdG, 중금속 농도의 분석을 실시하였다. 혈중 다이옥신의 경우 작업환경에서 다이옥신이 높게 측정된 A, C소각장의 근로자 5명씩, 10명을 선정하여 진행하였다.

1) 혈중 다이옥신

혈중다이옥신은 연구 방법에서 언급하였듯이 혈장으로만 최소 20ml의 시료가 필요하고, 전혈로는 약 50ml이 필요한 검사이며, 검사 건당 70만원 내외의 비교적 고가검사로 많은 대상자를 포함하여 조사를 진행할 수 없었다. 따라서, 작업장내 다이옥신이 낮게 확인된 B소각장의 근무자는 포함시키지 않고, A, C소각장에서 근무경력, 작업부서 등을 고려하여 다이옥신 노출을 대표할 수 있는 근로자 5명씩을 선정하였다. 근무부서는 소각로 내부에 직접 출입을 하고 현장근무를 위주로 하는 근로자를 위주로 선정하였다. 대상자의 특성은 <표 III-28>과 같다.

<표 III-28> 혈중 다이옥신 검사 대상 근로자 일반특성

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
성별	남	남	남	남	남	남	남	남	남	남
나이	30대	30대	30대	50대	40대	40대	40대	40대	40대	40대
BMI (kg/m ²)	39.1	30.2	27.7	21.2	22.3	37.9	27.7	24.0	34.6	31.9
근무지	A	A	A	A	A	C	C	C	C	C
부서	현장	정비	정비	바닥재	정비	운영	운영	정비	운영	운영
경력(년)	5-10 년	5-10 년	5-10 년	15-20 년	5-10 년	10-15 년	15-20 년	15-20 년	15-20 년	15-20 년
구운고기 섭취빈도 (회/월)	12	8	5	6	4	2	4	3	1	4
흡연 (Pack-year)	18	15	-	30	-	-	-	20	-	10
음주 (회/월)	2	1	-	4	-	-	3	4	1	4

대상 근로자는 모두 남성으로, 평균 연령은 42.4세, 경력 평균 13년으로 나타났다. 근무부서는 사무부서, 크레인실, 제어실 등을 제외한 현장작업을 수행하는 근로자에서 선정을 하였다. 근무부서의 경우 일부 사무직, 크레인실 등의 경력이 있으나, 경력 대부분을 현장에서 근무하였다고 응답하였다. 이들 근로자에게서 정맥혈 약 50ml을 채혈하여 혈청을 분리 후 분석을 의뢰하였고 분석 결과는 <표 III-29>와 같다.

<표 III-29> 근로자들의 혈중 다이옥신류 농도

단위 : pg TEQ/g-lipid

분류	PCDDs (pg WHO-TEQ/g-lipid)							PCDFs (pg WHO-TEQ/g-lipid)										Total
	2378 -T4CDD	12378 -P5CDD	123478 -H8CDD	123678 -H8CDD	123789 -H8CDD	1234678 -H7CDD	08CDD	2378 -T4CDF	12378 -P5CDF	23478 -P5CDF	123478 -H8CDF	123678 -H8CDF	234678 -H8CDF	123789 -H8CDF	1234678 -H7CDF	1234789 -H7CDF	08CDF	
WHO 2005 TEF	1	1	0.1	0.1	0.1	0.01	0.0003	0.1	0.03	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.01	0.01	0.0003	
1	3.275	4.159	0.000	0.000	0.000	0.073	0.017	0.000	0.051	1.525	0.000	0.000	0.000	0.000	0.033	0.000	0.000	9.134
2	0.000	0.000	0.000	0.552	0.000	0.104	0.023	0.168	0.069	1.878	0.000	0.000	0.000	0.000	0.027	0.000	0.000	2.822
3	0.000	0.000	0.000	0.362	0.000	0.140	0.043	0.000	0.000	1.716	0.354	0.000	0.503	0.000	0.030	0.000	0.000	3.149
4	0.000	0.000	0.000	0.398	0.000	0.056	0.021	0.167	0.073	1.449	0.000	0.000	0.000	0.000	0.020	0.000	0.000	2.184
5	3.520	0.000	0.125	0.397	0.000	0.408	0.086	0.000	0.000	1.481	0.000	0.402	0.781	0.000	0.085	0.009	0.003	7.297
6	0.000	3.066	0.000	0.293	0.000	0.085	0.034	0.000	0.000	1.163	0.000	0.232	0.000	0.000	0.019	0.000	0.000	4.892
7	2.724	0.000	0.000	0.279	0.000	0.126	0.028	0.000	0.035	2.389	0.404	0.357	0.000	0.000	0.031	0.009	0.000	6.381
8	2.427	0.000	0.000	0.812	0.000	0.185	0.035	0.201	0.039	4.098	0.553	0.554	0.000	0.000	0.030	0.000	0.000	8.933
9	2.601	0.000	0.000	0.249	0.000	0.086	0.026	0.119	0.048	1.361	0.230	0.256	0.243	0.000	0.015	0.000	0.000	5.234
10	0.000	0.000	0.000	0.332	0.000	0.085	0.025	0.000	0.077	1.491	0.244	0.000	0.000	0.000	0.025	0.000	0.000	2.279
평균	1.455	0.722	0.013	0.367	0.000	0.135	0.034	0.066	0.039	1.855	0.178	0.180	0.153	0.000	0.032	0.002	0.000	5.230
표준 편차	1.565	1.545	0.040	0.210	0.000	0.103	0.020	0.087	0.030	0.857	0.208	0.208	0.277	0.000	0.020	0.004	0.001	2.641
최소	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.056	0.017	0.000	0.000	1.163	0.000	0.000	0.000	0.000	0.015	0.000	0.000	2.184
최대	3.520	4.159	0.125	0.812	0.000	0.408	0.086	0.201	0.077	4.098	0.553	0.554	0.781	0.000	0.085	0.009	0.003	9.134

근무자들의 혈중 다이옥신 농도는 각 동족체별 독성등가 환산농도 (WHO-TEQ)를 곱하고, 지방보정을 거친 결과, 최소 2.184, 최대 9.134 pg TEQ/g-lipid의 범위로 나타났고, 평균 5.230 pg TEQ/g-lipid, 중위수는 5.063 pg TEQ/g-lipid 이었다.

이를 2020년의 서울시에서 진행한 자원회수시설 주변 주민건강영향조사에서 실시한 인근 지역 주민 98명의 평균 농도인 6.63 pg TEQ/g-lipid와 비교하면 소각장 근로자들의 혈중 다이옥신 농도는 지역주민의 결과에 비해 높지 않았다. 그러나, 결과를 연령대별로 볼 때, 20대 1.46, 30대 4.16, 40대 4.72, 50대 6.60, 60대 이상 7.40pg TEQ/g-lipid로 연령에 따라 증가하는 경향이 있었다. 혈중 다이옥신 검사대상 근로자의 평균연령이 40대인 점을 고려하여, 40대 일반인구의 평균값인 4.72 pg TEQ/g-lipid와 비교하면 근로자의 혈중 다이옥신은 이보다 약간 높은 것으로 평가되었다.

이처럼, 전체 다이옥신 농도는 일반인구(소각장 인근주민)과 큰 차이가 없는 것으로 보이나, 다이옥신의 동족체별로 비교하면 큰 차이를 나타냈다. 특히, 다이옥신류 중 독성이 가장 높은 2,3,7,8-TCDD(독성 환산농도 '1')의 차이가 크게 나타났는데, 서울시 연구의 강남, 노원, 양천의 소각장 인근 지역 주민 93명의 평균 농도는 0.102pg TEQ/g-lipid인데 비해, 소각장 근로자의 평균 농도는 1.455pg TEQ/g-lipid로 약 14배 높게 측정되었다.

2) 소변 중 PAHs 대사체

PAHs의 대사산물로 요중 1-Hydroxypyrene, 2-Hydroxyfluorene, 2-Naphthol, 1-Hydroxyphenanthrene를 분석하였다. 보정을 위하여 소변 중 크레아티닌 농도를 각 값에 나누어 결과를 산출하였다. 값이 우측 편위(right-skewed)된 양상을 보여 평균과 표준편차가 아닌 중앙값과 1,3사분위수를 제시하였다.

<표 III-30> 소각장별 근로자의 소변중 PAHs 대사체 분포

대사산물 (단위: $\mu\text{g/g}$ creatinine)	결과값 (중앙값 [1사분위- 3사분위])	A 소각장	B 소각장	C 소각장
1-Hydroxypyrene	0.1 [0.1- 0.2]	0.09 [0.04- 0.14]	0.11 [0.07- 0.17]	0.17 [0.05- 0.34]
2-Naphthol	2.8 [0.5- 7.8]	1.68 [0.42- 8.3]	4.71 [1.19-13.18]	2.94 [0.22- 7.36]
2-Hydroxyfluorene	0.2 [0.1- 1.0]	0.16 [0.1- 0.96]	0.57 [0.22- 1.03]	0.17 [0.1- 1.25]
1-Hydroxyphenanthrene	0.1 [0.0- 0.2]	0.07 [0.03- 0.14]	0.11 [0.06- 0.18]	0.07 [0.04- 0.19]

3) 소변 중 중금속(납, 수은, 카드뮴)

소각장 근로자들의 중금속 노출 정도를 확인하기 위해 체내 중금속 수치를 반영하는 소변 중 중금속을 분석하였다. 총 68명의 요중 수은, 카드뮴, 납에 대한 분석결과는 <표 III-31>과 같다.

<표 III-31> 소각장별 근로자의 요중 중금속 농도

대사산물 단위: $\mu\text{g/g}$ creatinine)	결과값 (중앙값 [1사분위- 3사분위])	A 소각장	B 소각장	C 소각장
요중 수은	0.7 [0.4- 1.1]	0.84 [0.49- 1.39]	0.75 [0.32- 1.00]	0.58 [0.35- 1.02]
요중 카드뮴	1.3 [0.9- 1.9]	1.07 [0.85- 1.79]	1.63 [1.1- 2.06]	1.27 [0.78- 1.74]
요중 납	1.08 [0.55- 2.06]	0.99 [0.51- 2.07]	1.1 [0.65- 2.33]	1.13 [0.6- 1.83]

4) 소변 중 프탈레이트

프탈레이트는 합성수지를 부드럽게 하는 물질로 사용되며 일회용 용기, 식품 포장재, 건축 자재 등 일상생활에 다양하게 사용되며 만성적인 노출 시 내분비계 및 생식기계에 문제를 일으킬 수 있는 물질이다. 소각장에서 소각하는 물질에 따라 프탈레이트에 노출될 가능성이 있으므로 소각장 근무자의 프탈레이트 노출 정도를 파악하기 위해 소변 중 프탈레이트를 확인하였다.

<표 III-32> 소각장별 요중 프탈레이트 결과

대사산물 (단위: $\mu\text{g/g}$ creatinine)	결과값 (중앙값 [1사분위- 3사분위])	A 소각장	B 소각장	C 소각장
MMP	1.65 [0.69- 3.81]	2.5 [0.8- 3.99]	1.19 [0.57- 2.46]	1.73 [0.55- 6.27]
MEP	1.06 [0.54- 2.36]	0.7 [0.45- 2.17]	1.27 [0.7- 3.76]	1.15 [0.61- 2.6]
MEHHP	7.34 [4.76- 12.99]	8.82 [4.3- 16.65]	10.09 [5.54- 18.71]	5.69 [4.63- 8.32]
MEOHP	3.95 [2.27- 8.02]	4.82 [2.12- 8.72]	5.68 [2.52- 10.29]	3.14 [2.16- 4.78]
MnBP	18.76 [8.36- 35.28]	9.28 [5.78- 30.44]	32.06 [14.02- 47.5]	20.05 [11.7- 33.9]
MBzP	0.51 [0.2- 1.45]	0.4 [0.18- 1.08]	0.66 [0.18- 2.97]	0.64 [0.32- 1.66]
MECPP	9.56 [5.52- 17.45]	9.72 [5.47- 19.01]	12.82 [5.89- 23.46]	7.3 [5.24- 12.12]
MCPP	0.29 [0.19- 0.5]	0.29 [0.2- 0.56]	0.26 [0.19- 0.46]	0.37 [0.18- 0.5]

프탈레이트의 경우 세 사업장에서 일관되게 높거나 낮은 결과는 보이지 않았다. 프탈레이트의 종류에 따라 사업장별로 차이가 있었으며, A사업장은 MMP가, B사업장은 MEHHP, MEOHP, MnBP, MBzP, MECCP가, C사업장은 MCPP가 높았다.

5) 일반 인구집단과 비교

소각장 근무자들을 대상으로 측정한 요증 PAH, 중금속 및 프탈레이트 대사산물을 일반 인구집단의 수준과 비교하고자 하였다. 제3기 국민환경보건 기초조사에 참여한 대상 중 본 연구집단의 대상자와 나이와 성별이 유사한 집단을 성향점수매칭법을 사용하여 5배수로 추출하여 구성하였다.

<표 III-33> 소각장 근무자와 대조군(일반인구)의 요증 PAHs 대사산물, 프탈레이트, 중금속 비교

구분		대조군 (N=335)	소각장 근무자 (N=67)	A소각장 (N=27)	B소각장 (N=16)	C소각장 (N=25)
연령		45.0 [38.0-53.0]	45.0 [38.0-54.0]	45.5 [36.0-55.0]	45.0 [37.0-47.0]	45.0 [41.0-53.0]
성별	남자	295 (88.1%)	59 (88.1%)	26 (96.3%)	13 (81.2%)	21 (84.0%)
	여자	40 (11.9%)	8 (11.9%)	1 (3.7%)	3 (18.8%)	4 (16.0%)
1-Hydroxypyrene		0.3 [0.1-0.6]	0.1 [0.1- 0.2]	0.1 [0.0-0.1]	0.1 [0.1- 0.2]	0.2 [0.1- 0.3]
2-Naphthol		3.2 [1.3-10.8]	2.8 [0.5- 7.8]	1.7 [0.4-7.9]	5.7 [1.9-13.2]	2.8 [0.1- 6.2]
2-Hydroxy fluorene		0.5 [0.3-1.4]	0.2 [0.1- 1.0]	0.2 [0.1-0.8]	0.6 [0.3- 1.0]	0.2 [0.1- 1.2]
1-hydroxy phenanthrene		0.2 [0.1-0.3]	0.1 [0.0- 0.2]	0.1 [0.0- 0.1]	0.1 [0.1- 0.2]	0.1 [0.0- 0.2]
MEHHP		14.1 [8.1-22.8]	7.7 [4.9-12.9]	8.8 [4.6-16.3]	11.1 [5.5-18.7]	5.7 [4.7- 8.5]
MEOHP		10.5 [6.1-17.8]	4.0 [2.4- 8.0]	4.8 [2.3- 8.5]	6.8 [2.5-10.3]	3.2 [2.2- 4.7]
MnBP		25.0 [13.9-47.2]	19.0 [8.8-35.0]	9.3 [5.8-29.7]	32.5 [17.7-47.5]	19.0 [11.5-33.6]
MBzP		2.2 [1.1- 4.8]	0.5 [0.2- 1.4]	0.4 [0.2- 1.0]	0.7 [0.2- 3.0]	0.6 [0.3- 1.5]
MECPP		22.8 [13.7-42.7]	9.7 [5.6-17.4]	9.7 [5.6-18.3]	12.5 [5.9-23.5]	7.3 [5.3-12.3]
MCCP		1.1 [0.7-1.9]	0.3 [0.2- 0.5]	0.3 [0.2- 0.5]	0.3 [0.2- 0.5]	0.4 [0.2- 0.5]
요증 수은		0.5 [0.3-0.7]	0.7 [0.4- 1.1]	0.8 [0.5- 1.3]	0.8 [0.3- 1.0]	0.6 [0.4- 0.9]
요증 카드뮴		0.5 [0.3-0.8]	1.3 [0.9- 1.9]	1.1 [0.9- 1.8]	1.7 [1.1- 2.1]	1.3 [0.8- 1.7]

전체 연구 대상자들의 요중 PAH 및 프탈레이트의 대사산물들은 일반 인구집단 대조군에 비해 낮은 수치가 검출되었으며, 요중 수은 및 요중 카드뮴은 인구집단에 비해 높은 수치가 검출되었다.

6) 소변 중 8-OHdG

요중 8-OHdG는 세포핵 및 미토콘드리아의 DNA에서 자유활성산소로 인한 산화손상의 부산물이며 이는 체내 산화스트레스 및 발암기전의 지표로서 사용되는 대표적인 물질 중 하나이다. 산화스트레스가 발암 과정의 한 경로이며, 발암 과정의 initiation, promotion 과정에서 산화스트레스가 발생하며 8-OHdG가 생성되므로 본 검사는 소규모 인구 집단 및 실험실 연구에서 발암성을 간접적으로 확인하는 방법 중 하나이다. 질량 분석을 통해 측정한 요중 8-OHdG에 대해서 가장 최근에 보고된 메타분석 연구에 의하면 BMI <25kg/m² 군에 대해서 1사분위 및 4사분위 값이 3 to 5.5 ng/mg creatinine (median: 3.9 ng/mg creatinine)수준이며, 비만(BMI >25kg/m²) 집단에서는 5.9 -19.8 ng/mg creatinine 수준으로 알려져 있다⁵²⁾. 대상자 67명에 대해 중앙값은 5.03ng/mg creatinine이었으며, 1사분위수와 3사분위수 값은 각각 2.21, 9.11ng/mg creatinine이었다. 기하평균은 5.01ng/mg creatinine이었다.

52) Graille, Melanie, et al. "Urinary 8-OHdG as a biomarker for oxidative stress: A systematic literature review and meta-analysis." International journal of molecular sciences 21.11 (2020): 3743.

IV. 고찰 및 제언

.....

IV. 고찰 및 제언

1. 연구결과 요약

폐기물 소각장에서 발생할 수 있는 유해인자를 작업환경측정을 통해 평가하고, 해당 근로자들의 생체시료, 설문조사를 통해 건강영향을 평가하였다. 본 연구의 대상 소각장의 운영은 민간업체에 위탁하여 운영되고, 산업안전보건법에 의거, 작업환경측정, 특수건강진단을 통해 주기적으로 보건관리를 수행해오고 있었다. 소각로의 설비나 운영이 장기간에 걸쳐 동일하게 운영되므로 작업환경측정의 항목은 거의 변화가 없이 측정이 되고 있었다. A, C 소각장의 최근 3년의 작업환경측정 결과를 확보하여 작업환경측정 대상 인자, 측정결과와 본 연구의 결과를 일부 비교해 보았다. A 소각장에서는 납, 니켈, 망간, 크롬 등의 중금속과, 용접흄, 광물성 분진, 소음 등에 대해서 작업환경측정을 실시하였고, 노출기준을 초과하는 인자는 없었으며, 상반기, 하반기로 나누어 6개월에 1회 작업환경측정을 실시하고 있었다. C 소각장에서도 유사하게 중금속, 분진, 가스상 물질 등에 대해서 6개월에 1회로 작업환경측정을 전문기관에 의뢰하여 실시하고 있었다.

<표 IV-1> A 소각장의 최근 3년간의 작업환경측정 결과

유해인자	측정 공정수	측정기록
납 및 그 무기화합물	1	검출한계미만 - 0.0031mg/m ³
니켈(금속)	1	검출한계미만
니켈(불용성무기화합물)	1	검출한계미만
망간 및 그 무기화합물	2	불검출 - 0.0102mg/m ³
산화 마스네슘	2	0.0049 - 0.1725mg/m ³
알루미늄 및 그 화합물(가용성염)	1	검출한계미만
이산화티타늄	1	검출한계미만 - 0.0022mg/m ³
산화철분진과 흙	2	0.0043 - 0.0793mg/m ³
크롬과 그 무기화합물(금속과크롬3가화합물)	1	불검출
크롬과 그 무기화합물(불용성6가크롬화합물)	1	검출한계미만 - 0.0002mg/m ³
황산(pH2.0이하 강산)	1	검출한계미만
암모니아	1	검출한계미만 - 0.0696ppm
용접흙 및 분진	1	0.4992 - 1.4379mg/m ³
기타분진	4	0.6745 - 2.7688 mg/m ³
산화알루미늄	3	검출한계미만 - 1.907mg/m ³
소음	4	75.9 - 79.2dB(A)
일산화탄소	1	5.6 - 20.125ppm
일산화질소	1	검출한계미만 - 0.4919ppm
이산화질소	1	검출한계미만 - 1.5217ppm

<표 IV-2> C 소각장의 최근 3년간의 작업환경측정 결과

유해인자	측정 공정수	측정기록
기타분진(산화규소1%이하)	1	0.0269 - 1.05363mg/m ³
아황산가스	1	불검출 - 0.0386ppm
일산화질소	1	불검출
이산화질소	1	불검출
포름알데히드	1	불검출 - 0.0139ppm
일산화탄소	3	10.5 - 20.5ppm
기타광물성분진	3	0.11162 - 0.46750mg/m ³
납 및 그 무기화합물	4	0.00006 - 0.00591mg/m ³
크롬(금속과 크롬 3가화합물)	4	0.00024 - 0.00154mg/m ³
바륨(가용성 화합물)	4	0.00005 - 0.00279mg/m ³
구리(분진및 미스트)	2	0.00007 - 0.0007mg/m ³
망간 및 무기화합물	4	0.00031 - 0.00117mg/m ³
산화철분진과흙	4	0.0014 - 0.03429mg/m ³
카드뮴 및 그 화합물	4	불검출 - 0.00045mg/m ³
산화아연(분진)	2	0.0001 - 0.00069mg/m ³
수은(아릴 및 알킬화합물제외)	4	불검출
크롬(6가)화합물(수용성)	4	불검출 - 0.0001mg/m ³
용접흙및분진	1	0.12808 - 2.11192mg/m ³
구리(흙)	2	0.00006 - 0.00528mg/m ³
산화아연(흙)	2	0.0002 - 0.04696mg/m ³
이산화티타늄	1	0.00006 - 0.00817mg/m ³
니켈(불용성무기화합물)	1	불검출 - 0.00051mg/m ³
암모니아	1	불검출 - 0.0229ppm
알루미늄(가용성염)	1	불검출 - 0.0009mg/m ³
수산화나트륨	1	흔적 - 0.0868mg/m ³

이번 조사에서 실시한 A, C소각장의 중금속 측정결과는 과거 각 소각장에서 실시한 작업환경측정결과의 범위에 모두 포함되었다. 벤젠, 톨루엔, 크실렌과 같은 유기용제는 해당 소각장에서 작업환경측정 결과가 없어 비교가 어려우나, 이번 연구에서는 모두 노출기준 미만으로 확인되었다. 2007년 연구에서 21개 소각장 중 2개소에서 벤젠이 확인이 되기는 하였으나 전체적으로 노출기준을 초과하지 않는 범위로 나온 것과 유사한 결과로 해석된다.

1) 다환방향족탄화수소(PAHs)

PAH는 연료 및 기타 유기물질들의 불완전 연소로 인해 형성되는 물질로, 단일 물질이 아닌 100가지 이상의 혼합물을 지칭한다. 폐암, 피부암, 방광암과 연관이 있고, 후두암, 신장암에 대해서도 역학적 근거를 바탕으로, IARC에서 지정한 group 1 carcinogen이다. 주로 연소과정에서 발생하는데 석탄, 석유제품 관련 업종의 근로자들에서 노출이 발생한다. PAHs의 인체 노출 정도를 확인하기 위해서 기중 PAHs중 구성 비율이 일정하면서도 많이 포함되어 있는 물질들의 대사산물인 1-hydroxypyrene, 2-naphthol 등을 사용하여 노출수준을 간접적으로 파악하는데 이용한다.

문헌고찰에서는 소각장 근로자들의 PAHs 노출과 그에 따른 대사산물이 대조군에 비해 높다는 연구결과가 다수 확인되었다. 그러나 2007년의 국내 연구와 이번 연구의 작업환경측정에서는 유의하게 높은 수준의 PAHs는 확인되지 않았다. 또한, 근로자들의 PAHs 대사산물도 국민건강영향조사 결과의 일반 인구와 비교하였을 때 높지 않게 확인되었다. 본 연구의 대상 소각장의 연소 과정에서 불완전 연소의 부산물이 소각장 내부에서 확산될 가능성이 높지 않다는 것을 시사하는 결과이다. 또한, 과거 연구에서 1-hydroxypyrene의 노출 기준으로 사용한 4.6 $\mu\text{g/L}$ 를 초과하는 근로자는 없었다. 대상 소각장 및 근무자가 다르므로 직접적인 비

교가 어렵지만, 작업환경측정결과를 종합하여 볼 때 PAHs에 대한 노출 수준은 과거에 비해 낮은 수준으로 관리되고 있는 것으로 보인다.

PAHs 측정 결과와 근로자들의 PAHs 대사산물과 평가할 때, 소각장에서 발생하는 PAHs의 노출은 일반 사업장에 비해 양호한 수준이고, 그에 따른 노출 평가도 크지 않은 것으로 추정된다. PAH 노출은 직업적인 노출도 있으나 비직업적인 노출로 일상생활에서의 노출경로도 다양하다. 흡연이 주요한 PAH의 노출원으로 잘 알려져 있으며, 비흡연자에서는 식품이 주된 노출원이고, 노출 경로는 흡입, 섭취, 피부 등의 경로가 있다. 본 조사의 결과분석에서 국민건강영향조사의 일반인구와 매칭하여 분석한 결과, 소각장 근로자의 요증 PAHs 대사산물이 일반인구에 비해 높지 않은 점이 시사하는 것은, 소각장 내부의 PAHs 노출이 크지 않고, 대사산물에 영향을 미치는 생활환경, 개인습관에 더 영향을 받는 것으로 해석할 수 있다.

그러나, 소각장 내 PAHs 농도를 일반대기 또는 공단지역 대기의 농도와 비교하면 높은 편이다. 정종현 등⁵³⁾이 공단지역 대기 중 PAHs의 농도와 분포를 분석한 연구에서 총 PAHs를 $14.52-193.48\text{ng/m}^3$ 으로 보고하였다. 또한, 대부분의 지점에서 벤조(a)피렌의 농도가 낮게 측정되었으나 일부 지점에서 2.89ng/m^3 으로 유럽연합 기준인 1ng/m^3 을 초과하는 것으로 나타났다. 참고로, WHO에서는 유럽연합 기준보다 낮은 0.12ng/m^3 을 제시하고 있다.

이번 연구에서 대기 중 PAHs의 범위는 $53.9-681.11\text{ng/m}^3$ 로 공단지역의 대기 수준보다 높게 나타났고, 벤조(a)피렌 또한, 일부 지점에서 5.37ng/m^3 으로, 유럽연합 기준(1ng/m^3)이나, WHO의 기준(0.12ng/m^3)을 크게 초과하였다. 그러나 비교대상을 실외 대기환경이 아닌 다른 사업장의 작업환경과 비교하면 측정된 PAHs의 범위가 월등히 높지는 않다. 주귀돈 등⁵⁴⁾의 금속가공유 취급 근로자를 대상으로 한 연구에 따르면,

53) 정종현, 피영규, 조상원 등. 공단지역 대기중 다환방향탄화수소화합물(PAHs)의 농도수준 및 분포특성, Clean Technology, 17(4), 2011, 379-388

열처리작업에서의 총 PAHs 기하평균은 $3.44\mu\text{g}/\text{m}^3$, 비열처리작업에서의 총 PAHs의 기하평균은 $0.13\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 평가되었다. 또한, 2007년의 소각장 연구에서는 나프탈렌을 제외한 총 PAH는 평균 $2.79\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 단위를 환산하면 과거 연구에 비해 30% 수준으로 낮게 측정되었다.

정리하자면, 이번 조사대상 소각장 내부의 작업환경에서의 PAHs는 과거의 타 소각장과, 열처리 과정의 타 사업장과 비교하면 낮은 수준으로 확인되었으나, 일반 공단지역의 대기 수준보다는 높게 평가되었다. 일부 지점의 벤조(a)피렌의 농도는 유럽이나 WHO기준을 초과하는 것으로 확인되었다.

측정대상 소각장의 지점별 PAHs 측정결과에서는 과거 연구에 비해서 낮은 수준을 보였으나, 2007년 연구에서는 개인시료포집장치로 측정하였고, 본 연구에서는 고용량 공기시료채취기(high volume air sampler)를 사용한 데에서 오는 차이도 있을 수 있다. 한편, 측정한 PAHs 중, 국제암연구소(IARC)에서 Carcinogen으로 언급되고 있는 인자로 벤조(a)피렌(Group 1), 다이벤조(a,h)안트라센(Group 2a)이 있다. 벤조(a)피렌의 경우 대부분의 측정지점에서 검출한계미만으로 확인되었으나, C소각장의 소각로 상부와, 투입호퍼에서 각각 5.37 , $0.16\text{ng}/\text{Sm}^3$ 으로 측정되었다. 다이벤조(a,h)안트라센은 1.72 , $0.55\text{ng}/\text{Sm}^3$ 으로 측정되었다.

이번 조사는 일반 작업환경측정에서 사용하는 저유량 펌프나 개인시료 측정 방식이 아닌, 일반 대기 환경조사와 동일한 지역시료 측정으로 고용량 공기시료채취기로 24시간 동안 포집한 결과이다. 따라서, 결과의 해석에는 개인시료, 지역시료 여부, PAHs의 측정장치(저유량펌프, 고용량 공기시료 채취기)에 따라 영향이 있을 수 있다는 점을 고려해야 할 것이다.

54) 주귀돈, 김은아, 최성봉, 김명옥. 금속가공유 취급 근로자의 다핵방향족탄화수소 노출평가. 한국산업위생학회지 17(1), 2007, 71-80

2) 다이옥신

A 소각장 상부에서 측정한 다이옥신 및 퓨란 17종의 총합은 0.550pg I-TEQ/Sm³, C 소각장은 0.989pg I-TEQ/Sm³로 측정되었다. 과거 2007년 산업안전보건연구원의 연구과제에서 10개 소각장에서 실시한 기중 다이옥신 측정값은 0.2024-47.7629pg I-TEQ/Sm³의 넓은 분포를 보였는데, 이번 조사의 측정값은 이와 비교할 때 유의하게 높게 나온 결과는 아니다.

작업환경의 대기 중 다이옥신의 기준값이나, 비교 대상은 명확하지 않다. 환경부에서는 시간당 처리능력이 2톤 이상인 생활폐기물 소각시설의 경우 ‘배출기준’을 0.1ng(100pg) I-TEQ/Sm³로 정하고 있는데, 이는 작업환경의 다이옥신이 아닌, 굴뚝에서 배출되는 배기가스를 측정하여 규정하는 기준값으로 근로자들이 근무하는 작업환경의 기중 다이옥신과 비교, 평가하기에는 부적절하다. 현재, 다이옥신은 작업환경측정 대상 물질도 아니고, 특수건강진단 대상 인자도 아니며, 작업환경에 권고되는 적합한 노출기준이나, 환경기준이 없는 현실이다. 따라서, 환경부에서 제시한 일반 대기환경기준인 0.6pg I-TEQ/Sm³와 비교하는 것이 배출기준과 비교하는 것보다 엄격한 기준으로서 적절할 것으로 생각된다. 결과의 해석에 있어서, 일반 생활환경, 대기기준과 작업환경기준은 달리 평가해야 하는 것은 분명하다. 그러나, 다이옥신의 경우 배출기준과 일반 대기환경기준만 마련되어 있고, 다이옥신이 배출되는 사업장 내부의 기준은 제시되어 있지 않은 것은 향후 해결해 가야 할 과제일 것이다.

A 소각장의 경우 대기환경기준을 초과하지는 않았으나 일반 대기환경기준치의 92%에 해당하는 수치를 보였고, C 소각장은 0.989pg I-TEQ/Sm³로 대기환경기준보다 1.65배 높은 수준으로 초과하는 것으로 확인되었다. B 소각장의 경우 소규모 소각장으로 측정 지점 또한 A, C 소각장과 달리 투입 호퍼에서 측정하여 대조군 수준내지 일반 대기 환경과 유사한 수준의 다이옥신이 측정되었다. 한편, 2020년 서울시 자원회

수시설 주변 주민건강영향조사 보고서⁵⁵⁾에 따르면, 소각장 인근의 지역에서 측정한 대기중 총 다이옥신의 분포는 0.018 - 0.265 pg I-TEQ/Sm³수준으로 모두 대기환경 기준인 0.6pg I-TEQ/Sm³ 미만으로 확인되었다.

<표 IV-3> 서울지역 소각장 주변 지역의 대기 중 다이옥신(2020년)

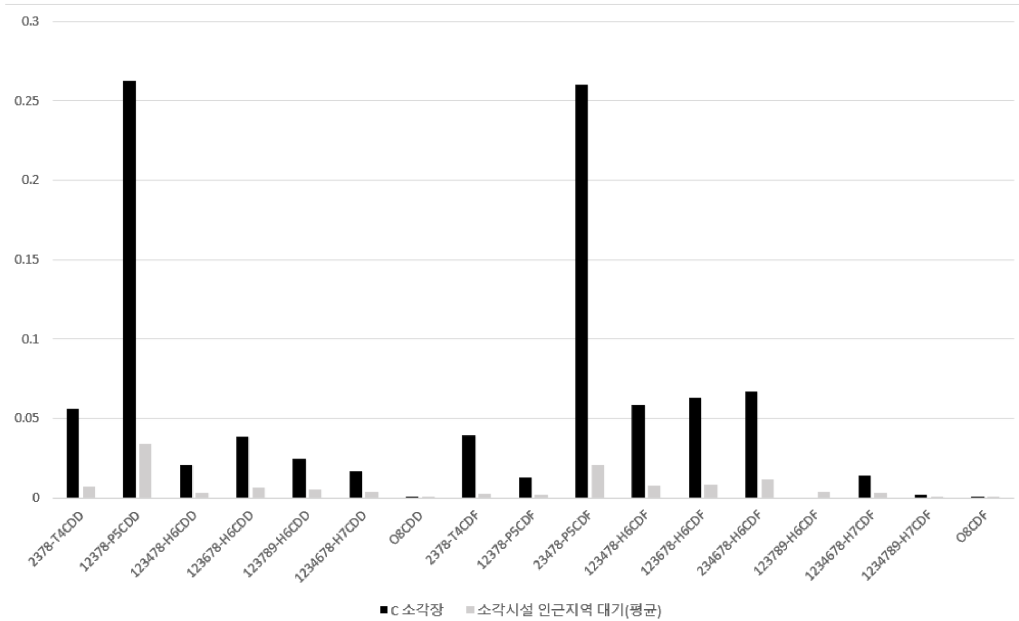
구분	양천 한신청구	양천 목동	강남 수서	강남 수서주공	노원 그린	노원 학여울
2378-TCDD	0.0065	0.0070	0.0147	0.0105	0.0000	0.0028
12378-PeCDD	0.0214	0.0358	0.0794	0.0597	0.0055	0.0037
123478-HxCDD	0.0254	0.0264	0.0682	0.0606	0.0039	0.0034
123678-HxCDD	0.0539	0.0561	0.1493	0.1284	0.0057	0.0062
123789-HxCDD	0.0441	0.0491	0.1225	0.0987	0.0038	0.0049
1234678-HpCDD	0.3184	0.2624	1.0176	0.8644	0.0199	0.0202
12346789-OCDD	0.4792	0.4076	1.3902	1.1757	0.0426	0.0400
2378-TCDF	0.0256	0.0309	0.0593	0.0407	0.0079	0.0079
12378-PeCDF	0.0772	0.0450	0.1472	0.1169	0.0086	0.0110
23478-PeCDF	0.0769	0.0490	0.1493	0.1126	0.0097	0.0104
123478-HxCDF	0.0909	0.0742	0.1569	0.1292	0.0111	0.0137
123678-HxCDF	0.0863	0.0669	0.1654	0.1466	0.0134	0.0150
234678-HxCDF	0.1090	0.0976	0.2713	0.2062	0.0116	0.0131
123789-HxCDF	0.0404	0.0368	0.0764	0.0538	0.0062	0.0080
1234678-HpCDF	0.3422	0.2882	0.7925	0.6223	0.0320	0.0361
1234789-HpCDF	0.0548	0.0491	0.0875	0.0662	0.0084	0.0082
12346789-OCDF	0.2030	0.1991	0.2618	0.2318	0.0317	0.0330
PCDD/Fs	2.0553	1.7812	5.0096	4.1244	0.2222	0.2374
pg I-TEQ/m3	0.115	0.102	0.265	0.207	0.014	0.018

55) 임영옥 등, 자원회수시설 주변 주민건강영향조사 최종보고서, 연세대학교 환경공해연구소, 서울특별시, 2020.

다이옥신 동족체별 분포를 보면 기중 다이옥신류의 성상을 파악할 수 있다. 이번 연구에서 다이옥신이 가장 높게 측정된 C 소각장의 동족체별 분포와 서울시 자원회수시설 인근의 6개 지점의 기중 다이옥신류의 평균 값의 분포를 비교하면 <표 IV-4>와 같다.

<표 IV-4> C 소각장 내부 다이옥신과 인근 6개 지역 지점별 대기 중 다이옥신 비교(2020년)

구분	C소각장	C소각장 (I-TEQ)	서울시 6개지점 평균	서울시 6개지점 평균 (I-TEQ)
2378-TCDD	0.056	0.056	0.0069	0.0069
12378-PeCDD	0.263	0.132	0.0342	0.0171
123478-HxCDD	0.208	0.0208	0.0313	0.00313
123678-HxCDD	0.385	0.0385	0.0666	0.00666
123789-HxCDD	0.246	0.0246	0.0538	0.00538
1234678-HpCDD	1.647	0.0165	0.417	0.00417
12346789-OCDD	1.281	0.00128	0.589	0.000589
2378-TCDF	0.391	0.0391	0.0287	0.00287
12378-PeCDF	0.421	0.0211	0.0676	0.00338
23478-PeCDF	0.868	0.434	0.0679	0.0340
123478-HxCDF	0.589	0.0589	0.0793	0.00793
123678-HxCDF	0.63	0.063	0.0822	0.00822
234678-HxCDF	0.669	0.0669	0.118	0.0118
123789-HxCDF	0	0	0.0369	0.00369
1234678-HpCDF	1.393	0.0139	0.352	0.00352
1234789-HpCDF	0.222	0.00222	0.0457	0.000457
12346789-OCDF	0.673	0.000673	0.160	0.00016
PCDD/Fs	9.943	0.989	2.238	0.120



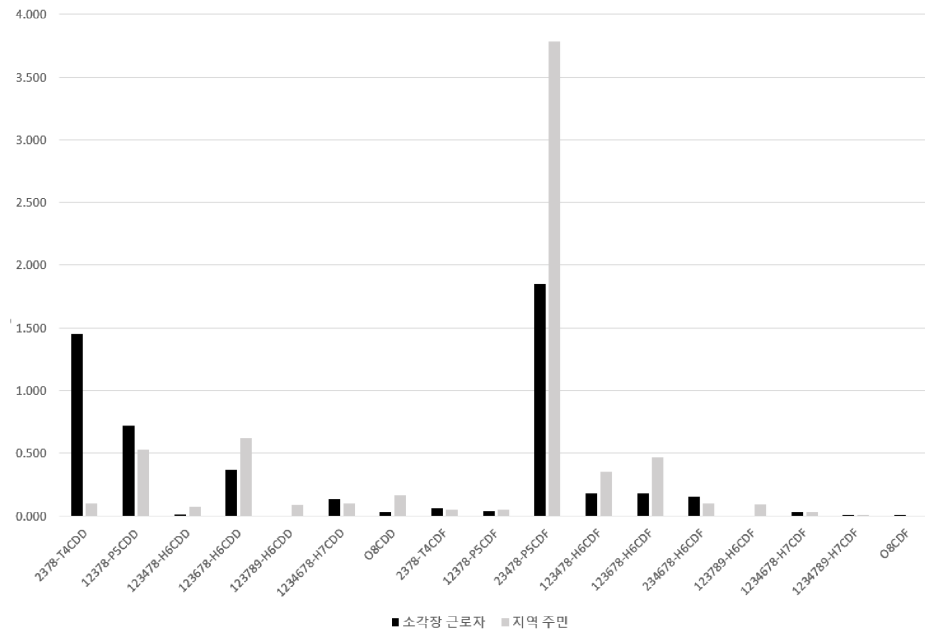
[그림 IV-1] C 소각장과 인근지역의 다이옥신 동족체별 농도비교(pg I-TEQ/Sm³)

대부분의 동족체가 일반 대기중 다이옥신 측정값보다 높게 나타났다. 특히, 결과에서 언급한 독성 등가환산 농도 I-TEQ가 1인 2,3,7,8-TCDD와 1,2,3,7,8-PCDD, 퓨란류 중에서 가장높은 0.3인 2,3,4,7,8-PCDF의 차이가 두드러졌다. 즉, 절대적인 측정치도 일반 대기보다 높은것도 주요하지만, 독성 등가계수가 높은 성상이 일반 대기보다 높은 것도 주요한 차이로 해석된다. 이는 일반대기의 다이옥신은 소각장 뿐만 아니라 공업 단지, 자동차, 일반 환경의 배출원이 모두 반영되고, 대기에 의해 희석이 되며, 무엇보다 소각장에서 배출되는 소각연기는 정화 시설의 필터를 거쳐 외부에 배출되는데에서 오는 차이로 해석된다.

반면, 소각로 상부에서 측정한 다이옥신은 소각로에서 일부 세어나온 기체로, 정화필터를 거치기 전단계의 연소가스와 성상이 유사할 것으로 생각된다. 이상적으로는 소각로는 근로자들이 근무하는 소각장 실내와 완전히 차단되어 공학적으로 설계가 되어야 하며, 소각장 실내는 외부 공기와 충분한 환기가 되어야 할 것이다. 그러나, 소각로의 가동연한이 증

가하는데에서 오는 기계적 결함과, 24시간 가동되는 소각로의 특성상 근본적인 보수, 정비의 어려움으로 인해, 소각장 내부에서 미세한 연소 가스의 유출이 있는 것으로 생각되었다. 특히 C 소각장은 소각로를 돔 형태의 지붕으로 외부와 차단되도록 건설되어 있는데, 실내 공기의 순환은 규모에 비해 양호하지 않아, 근로자들의 호소가 많았다.

혈중 다이옥신의 결과에서도 이러한 대기중 다이옥신의 성상 차이가 반영되었다. 소각장 근로자와 인근 지역주민의 전체 다이옥신 농도의 차이는 큰 차이가 없거나, 같은 연령대와 비교할 때 소각장 근로자들에서 근소하게 높은 것으로 평가할 수 있으나, 동족체 별로 평가할 때 그 성상의 차이가 크게 달랐다. 이는 소각장 내부 공기의 다이옥신 성상과, 외부 대기의 다이옥신 성상의 차이와 소각장 내부 공기의 장기간 노출로 인한 결과가 혈중 다이옥신의 차이로 이어진 것으로 추정된다.



[그림 IV-2] 소각장 근로자와 인근지역의 주민의 혈중 다이옥신 동족체별 농도비교(pg WHO-TEQ/g-lipid)

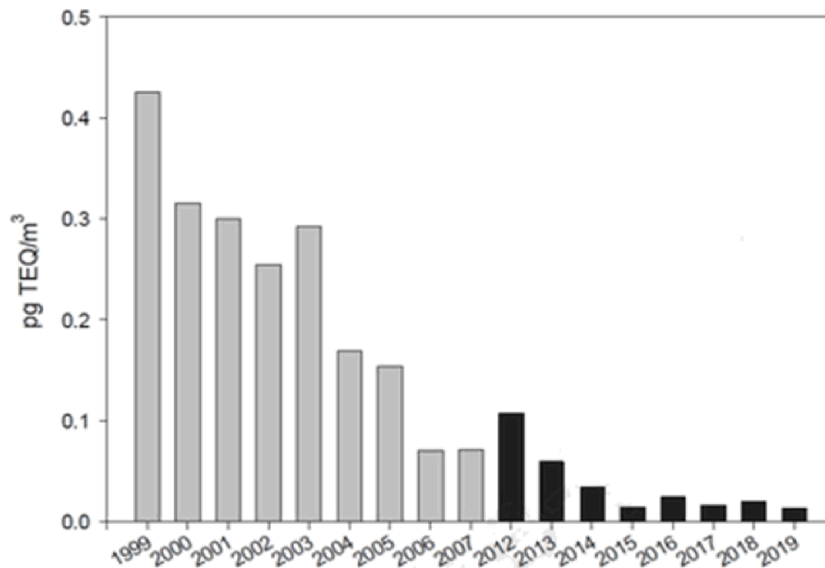
소각장 인근 지역 주민 93명의 2,3,7,8-TCDD의 평균 농도는 0.102pg TEQ/g-lipid인데 비해, 소각장 근로자의 평균 농도는 1.455pg TEQ/g-lipid로 약 14배 높게 측정되었다. 2,3,7,8-TCDD는 이탈리아의 세베소 사건, 베트남 전쟁의 고엽제(Agent Orange)에서 주로 언급되는 다이옥신으로서, 이 2,3,7,8-TCDD를 기준으로 타 동족체의 독성을 상대적으로 평가하는 만큼, 가장 독성이 강한 다이옥신이다. 미국의 베트남 참전 군인 1,499명을 대상으로 한 연구⁵⁶⁾에서는 2,3,7,8-TCDD의 농도의 중위수가 2.5ppt(parts per trillion, pg/g-lipid와 동일)로 조사되었고, 국내의 베트남 파견 군인 102명을 대상으로 한 연구⁵⁷⁾에서는 평균 1.2pg/g-lipid 중위수 0.9pg/g-lipid로 조사되었다. 본 연구의 소각장 근로자 10명의 2,3,7,8-TCDD의 평균은 1.455pg/g-lipid, 중위수는 1.213pg/g-lipid인데, 조사대상 10명 중 5명에서만 2,3,7,8-TCDD가 검출이 되었다. 검출된 근로자만을 대상으로 다시 평균과 중위수를 계산하면 각각 2.909pg/g-lipid, 2.724pg/g-lipid로 크게 증가한다. 이는 한국이나 미국의 베트남 파견 군인의 측정치보다 높은 수치이다. 물론 베트남 전쟁 때의 고엽제 노출의 평가가 자기기억식으로 평가가 되었고, 노출 후 약 40년이 경과한 시점의 퇴역 군인의 체내 다이옥신과의 비교는 적합한 비교대상이 아닐 수 있으나, 비교대상이 일반 인구가 아닌 과거 고엽제의 노출이 있었던 파견 군인과 동등한 수준 또는 그 이상의 혈중 2,3,7,8-TCDD가 확인된다는 것은 중요한 시사점이다.

한편, 2000년에서 2019년까지의 서울시 대기 중 다이옥신의 농도 변화 추세를 분석한 국내 연구⁵⁸⁾에 따르면 2000년도에는 0.3pg I-TEQ/S

56) Han K. Kang et al. Health Status of Army Chemical Corps Vietnam Veterans Who Sprayed Defoliant in Vietnam. American Journal of Industrial Medicine 49:875-884(2006)

57) Yi SW, Ohrr H, Won JU, Song JS, Hong JS. Serum 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin levels and their association with age, body mass index, smoking, military record-based variables, and estimated exposure to Agent Orange in Korean Vietnam veterans. J Prev Med Public Health. 2013 Sep;46(5):226-36. doi: 10.3961/jpmph.2013.46.5.226. Epub 2013 Sep 30. PMID: 24137525; PMCID: PMC3796648.

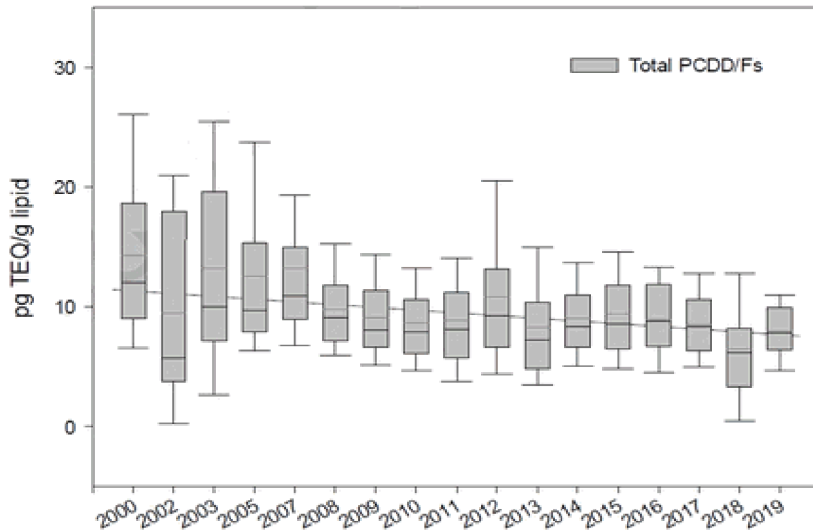
m³에서 2019년에는 0.01pg I-TEQ/Sm³ 수준으로 20년 동안 96%가 감소했다고 하였다.



[그림 IV-3] 서울시 대기중 총 다이옥신 농도 추이

반면, 서울시 거주민의 혈중 다이옥신의 농도는 15pg TEQ/g lipid에서 10pg TEQ/g lipid로 36% 감소하였다고 하였다.

58) Ho-Joong Kim et al. Long-term nationwide assessment of polychlorinated dibenzo-p-dioxins/dibenzofurans and dioxin-like polychlorinated biphenyls ambient air concentrations for ten years in South Korea, Chemosphere, Volume 263, 2021, 127903



[그림 IV-4] 서울시 거주민의 혈중 다이옥신 농도 변화

이 연구의 결과의 해석으로, 1999년 환경규제가 도입되면서 굴뚝, 여과장치, 필터 등의 공학적 대책 개선으로 다이옥신의 배출량이 감소하면서 대기 중 다이옥신의 감소로 이어진 것으로 평가하였다. 반면, 인체 내의 다이옥신의 감소량은 상대적으로 덜 감소한 것의 이유로는 식이로 유입되는 다이옥신의 차이와, 체내 지방조직에 축적되어 있는 다이옥신의 반감기가 길어 장기간 체내에 잔류하고 있는 것으로 보았다. 다이옥신의 반감기는 7-11년으로 보고되고 있다⁵⁹⁾. 다이옥신의 경우 인체내로 흡입, 섭취되는 경우 지방조직에 축적되어 체외로 잘 배출이 되지 않으므로, 장기간 소각시설에 근무한 근로자에서 2,3,7,8-TCDD를 포함한 혈중 다이옥신이 높게 측정된 것은 이를 반영한다.

본 연구에서의 특정 시점, 지점의 단일 측정 데이터를 바탕으로 일반화하여 평가하는 것은 물론 무리가 있겠으나, 이번 조사에서 소각장 작업환

59) WHO, Dioxins and their effects on human health. 2016
<https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/dioxins-and-their-effects-on-human-health>

경내 공기 중 총 다이옥신이 일반 대기환경 기준을 초과하는 수준인 점, 과거 연구에서도 최대 47.7629pg I-TEQ/Sm³의 다이옥신 측정치를 나타낸 점을 근거로, 소각장 내부의 다이옥신의 농도는 일반 대기보다 높은 수준임을 확인하였다. 또한, 측정된 작업환경내 공기 중 다이옥신의 동족체의 구성 성상이 일반 대기와 다르고, 근로자의 혈중 다이옥신의 성상도 지역 주민의 혈중 다이옥신과 다르다는 점은 작업환경에서의 다이옥신 노출을 간접적으로 시사하고 있다. 따라서, 소각장 내부에서 상시 또는 수시로 출입하며 장기간 동안 근무해 온 근로자의 경우 다이옥신 관련 건강영향이 발생할 가능성을 배제할 수 없을 것이다. 특히, 문헌고찰에서 언급한 특정암, 내분비 질환, 정자수 감소와 같은 생식독성에 관한 후속연구가 요구되고, 나아가 소각장을 비롯한 다이옥신 배출 사업장 근로자들의 다이옥신 노출 평가가 필요하다.

그러나, 검사 방법과 절차가 타 검사 항목에 비해 복잡하고, 시간과 비용이 많이 소요되는 다이옥신에 대한 평가를 일괄적으로 근로자들의 특수건강진단 항목으로 지정하기에는 무리가 있을 것이다. 이에 대한 대책으로, 소각장 근로자들에 대해서는 인근 지역주민을 대상으로 하는 건강영향조사 사업을 할 때, 내부 근로자도 포함하여 대조군으로 평가하는 방법이 바람직할 것이다. 물론, 해당 자치단체의 예산과 행정적인 절차가 과제로 남는다.

본 연구에서 진행한 다이옥신 측정에는 한계점으로는, 소각장별 1개 지점에서만 측정하여 비교성이 떨어진다는 것을 들 수 있다. 규모별, 소각방식별, 지역별로 포괄하여 실시하기에는 연구기간의 제한 등으로 인하여 한계점이 있었다. 그러나, 소각장의 규모별, 측정지점별 차이에 대해서는 경향성을 확인한 데에 의미가 있다. 실제 소규모인 B소각장의 호퍼 지점에서 측정한 다이옥신 측정값은 일반 대기 수준으로 낮게 확인되었다. 또한, 소각장 내부에서 일부 지점이 높게 확인되었으나, 소각시설의 운영 상태, 정비 상태, 소각하는 폐기물의 성상, 소각량에 따라 더 높거나

낮게 확인될 수 있어 추후 타 소각장의, 지점별 측정을 통한 비교연구, 또는 정기적인 모니터링이 필요할 것으로 생각된다.

3) 중금속

요중 납, 수은, 카드뮴에 대한 평가를 수행하였다. 소각장 근로자들의 요중 중금속 수준은 특수건강진단 및 임상에서 활용하는 진단기준을 고려하였을 때, 특정 중금속에 급성 및 만성 중독을 일으킬 수 있는 수준은 아니었다. 그러나, 국민환경보건 기초조사에서 추출한 일반인구 대조군에 비해서는 높은 수준의 요중 수은, 요중 카드뮴 확인되었다. 소각장 근무자들은 특정 중금속을 업무상 직접 접촉하는 업무는 없으나, 성분이 다양한 폐기물들이 투입되고 소각되는 과정에서 다양한 중금속에 노출될 가능성이 있다. 이에 특정 중금속에 급성으로 중독될 가능성은 낮지만 일반인구 집단에 비해서는 중금속에 대해 노출될 기회가 많다고 볼 수 있다. 특히, 이번 연구에서 대상이 된 일반 생활 폐기물 소각시설의 근로자들보다, 산업폐기물이나 지정폐기물의 소각시설의 근로자들의 노출이 더 있을 가능성이 있다.

최근 연구들에 의하면 체내 중금속이 축적될 경우, 낮은 농도에서도 고혈압⁶⁰⁾, 허혈성 심질환 등의 심혈관계질환⁶¹⁾ 및 내분비계 질환⁶²⁾의 발병에 영향을 미친다는 연구들이 지속적으로 보고되고 있다. 본 연구에서는 납, 카드뮴, 수은에 대해서 평가하였으며, 세 종류의 중금속이 모두 일반인구집단에 비해 높게 측정되었다. 결과의 해석에 있어서 중금속의 노출경로 또한 흡연, 식품에 의해 일부 영향을 받을 수 있으므로, 소각장의

60) Tellez-Plaza M, Navas-Acien A, Crainiceanu CM, Guallar E. Cadmium exposure and hypertension in the 1999-2004 National Health and Nutrition Examination Survey (NHANES). Environ Health Perspect. 2008;116(1):51-56.

61) Kazuko Yoshizawa et al, Mercury and the Risk of Coronary Heart Disease in Men, November 28, 2002 N Engl J Med 2002; 347:1755-1760

62) Tan SW, Meiller JC, Mahaffey KR. The endocrine effects of mercury in humans and wildlife. Crit Rev Toxicol. 2009;39(3):228-69

근무환경에서 노출되는 요인으로 인해 근무자들의 요중 중금속 농도가 높았다고 연관을 짓기는 다소 무리가 있을 수 있다. 특히, 작업환경측정에서 나타난 지점별 중금속 농도가 노출기준에 크게 미치지 않은 것은 소각장의 작업환경이 중금속의 주요 노출원으로 작용했을 가능성을 낮춘다. 그러나, 소각장 근무자들은 업무 및 근무환경의 특성상 소량의 다양한 유해물질에 노출되므로, 근무자들의 중금속 노출에 대한 관심은 지속적으로 필요할 것이다. 본 연구의 조사 대상 소각장에서는 작업환경측정과 특수건강검진으로 일부 중금속에 대한 평가는 이루어지고 있었다.

4) 요중 8-OHdG와 프탈레이트

요중 8-OHdG는 세포핵 및 미토콘드리아의 DNA에서 자유활성산소로 인한 산화손상의 부산물이며 이는 체내 산화스트레스 및 발암기전의 지표로서 사용되는 대표적인 물질 중 하나이다. 산화스트레스가 발암 과정의 한 경로이며, 발암 과정의 initiation, promotion 과정에서 산화스트레스가 발생하며 8-OHdG가 생성되므로 본 검사는 소규모 인구 집단 및 실험실 연구에서 발암성을 간접적으로 확인하는 방법 중 하나이다. 본 연구에서는 대조군을 선정하여 검사하지는 않았지만, 질량분석을 통해 측정된 요중 8-OHdG에 대해서 가장 최근에 보고된 메타분석 연구에 의하면 BMI <25kg/m² 군에 대해서 1사분위 및 4사분위 값이 3 to 5.5 ng/mg creatinine (median: 3.9 ng/mg creatinine)수준이며, 비만(BMI >25kg/m²) 집단에서는 5.9 -19.8 ng/mg creatinine 수준으로 알려져 있다. 본 연구의 대상 집단의 산화스트레스 수치에 영향을 주는 비만도 및 흡연 등에 대한 정보가 부족하여 결과 해석에 주의할 필요가 있다.⁶³⁾

프탈레이트 화합물은 PVC수지, PET, 폴리우레탄 등의 가소제로 사용

63) Graille, Melanie, et al. "Urinary 8-OHdG as a biomarker for oxidative stress: A systematic literature review and meta-analysis." International journal of molecular sciences 21.11 (2020): 3743.

되는 물질로, 체내에서 호르몬과 유사한 반응을 하여 내분비계 장애를 유발할 수 있는 독성 물질이다. 내분비계 뿐 아니라 간, 심장, 신장 등의 독성도 보고되고 있어 최근 환경 중의 프탈레이트에 대한 관심이 증대되고 있다. 최근에는 수질 및 공기를 통한 프탈레이트의 인체 노출 가능성이 제시되고 있어 환경 중 수질, 대기 중의 프탈레이트에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 최근의 중국의 소각장 관련 연구⁶⁴⁾에서 소각 과정에서 소각 물질에 포함된 프탈레이트가 연소 과정에서 근무자에게 노출될 수 있다는 연구결과가 보고된 바 있어 본 연구에서는 소각장 근무자를 대상으로 요중 프탈레이트에 대한 검사를 수행하였다. 프탈레이트는 20여종의 물질이 있으며 (DMP, DEP는 cellulose acetate, butyrate 등의 플라스틱, DEHP는 PVC, 의료용기, 음식포장재 등에 사용된다). 본 연구에서 소각장 근무자들의 요중 프탈레이트 수치는 일반 인구집단에 비해 낮은 편이었다. 사업장 별로 프탈레이트 분포의 차이는 있었지만 특정 사업장에서 일관되게 높거나 낮은 결과는 보이지 않았다.

5) 그 밖의 유해인자

본 조사의 작업환경측정에서 반영하지 못하였지만, 근무자들이 불편을 호소하는 가장 큰 문제점은 악취였다. 설문조사로 인지하는 유해인자를 복수응답으로 물었을 때 가장 많은 응답자를 보인 인자도 악취였다(52명, 76.5%). 소각장별로 차이는 있었으나, 반입장에서 가장 악취가 심하였으며 발생한 악취가 전 현장, 사무실 및 컨트롤 타워 등 독립된 공간에서도 강하게 느낄 수 있었다.

악취는 소각장별, 규모별, 음식물 쓰레기 처리 여부 등의 요인에 따라 소각장별로 차이가 많이 난다는 근로자들의 설명이 있었고, 이번 조사대

64) Lu S, Yang D, Ge X, Li L, Zhao Y, Li C, Ma S, Yu Y. The internal exposure of phthalate metabolites and bisphenols in waste incineration plant workers and the associated health risks. Environ Int. 2020 Dec;145:106101

상 소각장 중 악취는 생활폐기물을 주로 처리하는 B 소각장에서 가장 심하게 느껴졌다. 특히, A, C 소각장은 대도시에 위치한 하루 일일 소각량 수백톤의 대규모 시설로서, 인근 주택지에 바로 인접하고 있어, 악취에 대해서는 비교적 잘 관리가 되고있는 편이었다. 그러나 B 소각장은 지방의 군단위 도시의 소각장으로서, 인근에 주택지가 없고, 반입되는 폐기물이 대도시와 달리 음식물이 많이 섞여 있어 A, C소각장과 차이가 났다.

악취는 객관적으로 그 정도를 평가하기가 쉽지 않고, 특정 단일 물질에 의한 것이 아니라 다양한 폐기물에서 기화되어 발생하기 때문에 그 원인이 되는 물질을 작업환경측정이나 분석을 통해 정량화하기가 어렵다. 그러나 연구진이 느끼는 현장의 악취 수준은 상당히 높은 수준이었으며, 근무 중 상시 악취에 노출되는 근무자들은 대부분 악취에서 많은 스트레스를 호소하였다. 근무자들은 작업으로 인한 심리적 문제를 호소하는 경우가 다수 있었으며 우울증 선별검사에서 경, 중증의 우울증에 해당하는 대상자가 일부 있었다. 구조화된 설문지에서는 항목에 상세히 소개되지 않았지만, 많은 근무자들이 작업시 노출되는 악취로 인해 스트레스를 받고 있었으며 장기적인 악취 노출로 인한 건강영향에 대한 우려도 다수 호소하였다. 음식물을 포함한 다양한 물질의 매립 및 소각 전 과정에서 악취가 심하게 발생하는 것으로 보아 혐기성 세균이 매립지에 높은 농도로 존재할 가능성이 있으나 본 연구에서는 생물학적 유해인자에 대해서는 조사하지 못한 한계점이 있다. 추후 연구에서는 기중 세균, 진균, 내독소 등의 분포에 대한 평가도 수행이 필요할 것이다. 근로자 대표의 진술로 과거 소각장 근로자가 뇌수막염으로 업무상 질병으로 인정된 사례도 있다고 하였다.

이번 연구과제에서 조사대상 항목으로 선정되지 않은 항목 중 근골격계 질환에 대한 평가도 필요할 것으로 생각된다. 특히, 소각로 호퍼에 폐기물을 투입하는 크레인을 조정하는 크레인실의 근무자들은 근무시간에 거의 고정된 자세로 고개를 약 30도 이상 앞으로 굽힌 상태로 작업을 하

고 있어 장기간 근무시 경추에 근골격계 질환의 호발 가능성이 높을 것으로 보였다. 이는 근골격계 부담작업 제4호인 ‘지지되지 않은 상태이거나 임의로 자세를 바꿀 수 없는 조건에서, 하루에 총 2시간 이상 목이나 허리를 구부리거나 트는 상태에서 이루어지는 작업’에 해당되었다.



[그림 IV-5] 크레인실 근로자의 작업 자세



[그림 IV-6] 조종실에서 바라보는 크레인과 피트

위 그림에서 폐기물이 투입되기 전, 적재되어 있는 피트에서 자연발화의 위험성도 근로자들이 호소하였다. 피트에서는 수일간에 걸쳐 소각이

잘 되도록 숙성을 하는 기능이 있는데, 이 과정에서 자연발화가 발생하기도 한다. 폐기물의 자연발화는 폐기물 야적장이나, 매립장에서 상시 발생할 수 있는데, 쓰레기 피트의 경우에도 화재하여 대형사고로 이어질 가능성이 있었다. 실제로 화재가 발생한 경우도 있으며, 피트 내부에는 외부에서 조절할 수 있는 고압의 살수 장치가 마련되어 있을 정도이다.

물리적 인자인 고열작업에 대한 평가도 필요하다. 본 연구의 예비조사에서 소각로를 순회하면서 4-5층 높이의 소각로 상부, 반건식 반응탑의 온도계가 50℃가 넘게 측정이 되고 있어 간이로 WBGT로 검사를 실시하였고, 그 결과 경작업에서도 75%의 휴식이 필요한 기준인 32.2℃를 훨씬 상회하는 36.2℃로 측정되었다. 그러나, 작업장 내에 고열작업에 대한 대책은 얼음조끼 정도만 구비되어 있었고, 전해질 보충을 위한 대책이나 근로자들의 휴식시간 보장에 대한 절차는 마련되어 있지 않았다. 특히, 작업환경 측정이나, 특수건강검진에서도 명확한 고열작업임에도 평가나 검진이 이루어지고 있지 않아 개선이 필요해 보였다.

소각장의 근무환경은 제조업 사업장과는 다르게 특정 지역에서 고정적으로 업무를 하기보다는 다양한 부서와 공정을 이동하면서 근무를 하지는 양상이며, 중금속 및 용제와 같은 특정 물질을 높은 농도로 취급하지는 않지만 폐기물의 적재 및 소각과정에서 불특정 다수의 물질에 노출되는 특수한 작업환경이다. 본 연구에서는 과거 연구 및 최신 문헌들의 고찰을 통해 작업환경측정 및 생물학적 노출지표의 대상 물질을 선정하여 대한 평가를 실시하였다. 그러나 현장조사 결과, 폐기물의 종류 및 소각량 등 유해물질의 발생원이 사업장별, 시간별(일별), 공간별로 차이가 존재하여 특정 물질에 대한 일괄적인 정량적 평가로는 위험성 평가에 한계가 있다. 추후 연구에서는 질량분석법 등의 방법을 도입하여 소각장별로 노출되는 물질에 대해 다양한 시기 및 위치에서 포집된 시료를 정성 및 정량적으로 분석하여 조사하는 과정을 통해 노출되는 물질에 대한 위험성 평가가 각 소각장의 특성을 고려하여 이루어지는 설계가 필요할 것

이다.

많은 수의 근무자들이 24시간 교대근무를 수행하고 있었으며 이는 현 제도권 안에서 특수건강진단을 수행하는 과정에서 파악하여 관리되고 있는 것으로 보인다. 조사 대상 사업장에서 모두 야간근무에 대한 특수건강진단을 수행하고 있었다. 그러나 대부분의 소각장이 50인 미만 사업장으로 분류되어 있어 보건관리전문기관의 방문이나 사업장 보건관리자의 관리가 잘 이루어지지 않고 있어, 특수건강진단에 대한 사후관리가 미흡하였으며 이에 대해서는 근로자건강센터 등의 자원과 연계하거나 보건관리전문기관의 보건관리 위탁수행이 필요할 것이다.

2. 제한점

본 사전예방 역학조사를 수행하고 결과를 제시함에 있어서 여러 가지 한계점이 존재한다. 소각장의 대표성이 그 첫 번째로, 본 역학조사의 대상이 된 3개소의 소각장이 우리나라의 180개소의 소각장의 상황을 대변한다고 보기는 어렵다. 실제로, 2007년에 20개소의 소각장을 대상으로 진행된 연구과제에서도 다이옥신과 같은 일부 항목은 소각장별로 편차가 크게 나타났다. 다만, 본연구의 대상이 된 소각시설은 가동년수나 소각시설의 규모로 볼 때, A, C 소각장은 대규모 소각시설, B 소각장은 소규모 소각시설의 평균내지는 표본으로 해석할 수 있을 것으로 생각된다. 그러나, 본 연구대상 소각시설보다 작업환경이 더 열악하고 노출수준이 높은 소각장도 분명존재할 것이다.

두 번째 제한점으로 소규모의 연구대상자 수이다. COVID-19의 영향으로 인해 초기에 연구계획한 소각시설과 대상자수에 많이 미치지 못하였고, 특히 혈중 다이옥신의 경우 10명의 대상자로 평가하여 통계적 비교분석이 어려워 한계가 있었다.

세 번째 제한점은 단면연구의 한계점이다. 소각시설의 가동상태, 가동 정지시와 가동시의 비교, 대정비시 소각로 내부에 투입되는 상황 등의 특수상황을 모두 포함한 연구결과를 제시하지 못한 점이다. 소각장 가동형태, 불완전 연소 등에 대한 정보를 바탕으로 추후 보완될 필요가 있다.

3. 제언

본 사전예방 역학조사를 통하여 소각장 근로자에게 노출되고 있거나 노출될 가능성이 있는 여러 유해인자에 대한 정성적, 정량적 평가를 시행하였다. 본 연구의 출발점은 첫째, 2007년 이후 국내에서 소각장과 소속 근로자를 대상으로 진행된 후속 연구가 없었던 점, 둘째, 소각장 주변 거주민들을 대상으로 다양한 항목으로 장기간 추적관찰을 하는 건강영향 조사에 비해 소각장 내부의 근로자들에 대한 건강영향 평가는 상대적으로 소외된 점에서 시작되었다.

PAHs와 중금속, 분진에 대한 영향은 조사대상 소각장에서 실시해오고 있는 작업환경측정과 큰 차이 없는 결과를 보였고 유의하게 높거나 노출 기준을 초과하는 인자는 확인되지 않았다. 중금속, 교대근무 등에 대한 평가는 해당인자의 검사항목에 맞게 잘 수행되고 있다.

본 연구의 주요한 결과로, 작업장 내 다이옥신에서 일반 대기환경기준인 $0.6\text{ng I-TEQ}/\text{Sm}^3$ 를 초과하는 수준의 노출이 확인되었고, 다이옥신 동족체의 성상이 주변 대기환경의 성상과 많은 차이를 보이는 것이 확인되었다. 이와 유사하게, 근로자의 혈중 다이옥신에서도 주변지역 주민들보다 높은 수준으로 평가되었고, 다이옥신 동족체 중 가장 독성이 강한 2,3,7,8-TCDD의 농도가 지역 주민에 비해 14배 이상 높게 나타났다. 다이옥신에 대한 건강영향 평가는 현재도 연구가 진행 중이며, 발암성, 장기 건강영향에 대해서는 지속적인 연구과 측정 데이터를 축적해 가야할 것이다.

다이옥신이나 기타 유해인자에 대해서는 굴뚝, 인근 지역의 대기환경에 대한 평가를 할 때 내부의 일부 지점에서도 비교, 대조를 위해 측정이 필요할 것으로 생각된다. 또한, 소각장의 근로자에 대해서도 인근 지역주민의 건강영향조사와 맞추어 검진 항목과 다이옥신에 대한 평가가 동등한 수준으로 이루어질 것을 제언한다. 이를 통해 지역주민과 소각장 근로자들 사이에 발생할 수 있는 건강불평등을 막고, 장기적으로 소각장에서 발생하는 유해요인에 대한 예방과 관리를 통해 근로자의 건강을 보호할 수 있을 것이다.

참고문헌

- 구정완 등, 산업폐기물 소각장 근로자의 건강상태와 직업적 요인의 관련성 연구, 산업안전보건연구원(2007)
- 김기웅 등, 산업폐기물 소각로 근로자의 건강장해 평가 연구(I), 산업안전보건연구원(2002)
- 김기웅 등, 산업폐기물 소각로 근로자의 건강장해 평가 연구(II), 산업안전보건연구원(2004)
- 김대호 등, 업무상 질병으로 인정된 폐암 근로자의 유해물질 노출 특성에 관한 연구, 직업성폐질환연구소(2007)
- 신동천 등, 자원회수시설 주변 주민건강영향조사 최종보고서, 연세대학교 환경공해연구소, 서울특별시(2015)
- 임영욱 등, 자원회수시설 주변 주민건강영향조사 최종보고서, 연세대학교 환경공해연구소, 서울특별시(2020)
- 임종한 등, 국내 일부 소각장 근로자와 주변지역주민들의 PCDDs/Fs 노출과 건강영향평가, Korean J Prev Med 2003;36(4):314-322
- 환경영향평가서 내 위생, 공중보건 항목 작성을 위한 건강영향 항목의 평가 매뉴얼, 환경부(2013)
- Candela S, Ranzi A, Bonvicini L, Baldacchini F, Marzaroli P, Evangelista A, et al. Air pollution from incinerators and reproductive outcomes: A multisite study. Epidemiology. 2013; 24(6): 863- 70.
- Cao L, Zeng J, Liu K, Bao L, Li Y. Characterization and cytotoxicity of PM<0.2, PM0.2-2.5 and PM2.5-10 around MSWI in Shanghai, China. Int J Environ Res Public Health. 2015; 12(5): 5076- 89.
- Chao CL, Hwang, KC. Arsenic burden survey among refuse incinerator workers. J Postgrad Med. 2005; 51(2): 98- 103.
- Charbotel B, Hours M, Perdrix A, Anzivino-Viricel L, Bergeret A.

Respiratory function among waste incinerator workers. *Int Arch Occup Environ Health*. 2005; 78(1): 65– 70.

Chen HL, Su HJ, Guo YL, Liao PC, Hung CF, Lee CC. Biochemistry examinations and health disorder evaluation of Taiwanese living near incinerators and with low serum PCDD/Fs levels. *Sci Total Environ*. 2006; 366(2-3): 538– 48.

Chen HL, Su HJ, Lee CC. Patterns of serum PCDD/Fs affected by vegetarian regime and consumption of local food for residents living near municipal waste incinerators from Taiwan. *Environ Int*. 2006; 32(5): 650– 5.

Comba P, Ascoli V, Belli S, Benedetti M, Gatti L, Ricci P, et al. Risk of soft tissue sarcomas and residence in the neighbourhood of an incinerator of industrial wastes. *Occup Environ Med*. 2003; 60(9): 680– 3.

Cordier S, Lehebel A, Amar E, Anzivino–Viricel L, Hours M, Monfort C, et al. Maternal residence near municipal waste incinerators and the risk of urinary tract birth defects. *Occup Environ Med*. 2010; 67(7): 493– 9.

Deng C, Xie H, Ye X, Zhang H, Liu M, Tong Y, et al. Mercury risk assessment combining internal and external exposure methods for a population living near a municipal solid waste incinerator. *Environ Pollut*. 2016; 219: 1060– 8.

Domingo JL, Rovira J, Vilavert L, Nadal M, Figueras MJ, Schuhmacher M. Health risks for the population living in the vicinity of an integrated waste management facility: Screening environmental pollutants. *Sci Total Environ*. 2015; 518–519C: 363– 70.

Federico M, Pirani M, Rashid I, Caranci N, Cirilli C. Cancer

incidence in people with residential exposure to a municipal waste incinerator: An ecological study in Modena (Italy), 1991-2005. *Waste Manag.* 2010; 30: 1362- 70.

Floret N, Mauny F, Challier B, Arveux P, Cahn JY, Viel JF. Dioxin emissions from a solid waste incinerator and risk of non-Hodgkin lymphoma. *Epidemiology.* 2003; 14(4): 392- 8.

Fukuda Y, Nakamura K, Takano T. Dioxins released from incineration plants and mortality from major diseases: An analysis of statistical data by municipalities. *J Med Dent Sci.* 2003; 50(4): 249-55.

Galise I, Serinelli M, Bisceglia L, Assennato G. Health impact assessment of pollution from incinerator in Modugno (Bari). *Epidemiol Prev.* 2012; 36(1): 27- 33.

Garcia-Perez J, Fernandez-Navarro P, Castello A, Lopez-Cima MF, Ramis R, Boldo E, et al. Cancer mortality in towns in the vicinity of incinerators and installations for the recovery or disposal of hazardous waste. *Environ Int.* 2013; 51: 31- 44.

Graille, Melanie, et al. Urinary 8-OHdG as a biomarker for oxidative stress: A systematic literature review and meta-analysis. *International journal of molecular sciences* 21.11 (2020): 3743.

Han K. Kang et al. Health Status of Army Chemical Corps Vietnam Veterans Who Sprayed Defoliant in Vietnam. *American Journal of Industrial Medicine* 49:875-884(2006)

Hideo Kajihara et al. The Relationships between Dioxin Accumulation in Human Body and Eating Habits. *Organohalogen Compound.* 2004(66); 2566-2571

Ho-Joong Kim et al. Long-term nationwide assessment of

polychlorinated dibenzo-p-dioxins/dibenzofurans and dioxin-like polychlorinated biphenyls ambient air concentrations for ten years in South Korea, *Chemosphere*, Volume 263, 2021, 127903, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127903>.

Hours M, Anzivino-Viricel L, Maitre A, Perdrix A, Perrodin Y, Charbotel B, et al. Morbidity among municipal waste incinerator workers: A cross-sectional study. *Int Arch Occup Environ Health*. 2003; 76(6): 467- 72.

Ichiba M, Ogawa Y, Mohri I, Kondoh T, Horita M, Matsumoto A, et al. Analysis of urinary metabolites of polycyclic aromatic hydrocarbons in incineration workers. *J Occup Health*. 2007; 49(2): 159- 64.

Institute of Medicine. Veterans and Agent Orange; The National Academy Press: Washington, DC, 2009; p 7.

Leem JH, Hong YC, Lee KH, Kwon HJ, Chang YS, Jang JY. Health survey on workers and residents near the municipal waste and industrial waste incinerators in Korea. *Ind Health*. 2003; 41(3): 181- 8.

Lin CM, Li CY, Mao IF. Birth outcomes of infants born in areas with elevated ambient exposure to incinerator generated PCDD/Fs. *Environ Int*. 2006; 32(5): 624- 9.

Lu S, Yang D, Ge X, Li L, Zhao Y, Li C, Ma S, Yu Y. The internal exposure of phthalate metabolites and bisphenols in waste incineration plant workers and the associated health risks. *Environ Int*. 2020 Dec;145:106101

Oh E, Lee E, Im H, Kang HS, Jung WW, Won NH, et al. Evaluation of immuno- and reproductive toxicities and association between

immunotoxicological and genotoxicological parameters in waste incineration workers. *Toxicology*. 2005; 210(1): 65– 80.

Oh E, Lee E, Im H, Kang HS, Jung WW, Won NH, et al. Evaluation of immuno- and reproductive toxicities and association between immunotoxicological and genotoxicological parameters in waste incineration workers. *Toxicology*. 2005; 210(1): 65– 80.

Onozuka D, Yoshimura T, Kaneko S, Furue M (2008) Mortality after exposure to polychlorinated biphenyls and polychlorinated dibenzofurans: a 40-year follow-up study of Yusho patients. *Am J Epidemiol* 169(1):86–95

Parodi S, Baldi R, Benco C, Franchini M, Garrone E, Vercelli M, et al. Lung cancer mortality in a district of La Spezia (Italy) exposed to air pollution from industrial plants. *Tumori*. 2004; 90(2): 181– 5.

Ranzi A, Fano V, Erspamer L, Lauriola P, Perucci CA, Forastiere F. Mortality and morbidity among people living close to incinerators: A cohort study based on dispersion modelling for exposure assessment. *Environ Health*. 2011; 10: 22.

Ranzi A, Fustinoni S, Erspamer L, Campo L, Gatti MG, Bechtold P, et al. Biomonitoring of the general population living near a modern solid waste incinerator: a pilot study in Modena, Italy. *Environ Int*. 2013; 61: 88– 97.

Reis MF, Sampaio C, Aguiar P, Mauricio Melim J, Pereira Miguel J, Papke O. Biomonitoring of PCDD/Fs in populations living near Portuguese solid waste incinerators: Levels in human milk. *Chemosphere*. 2007; 67(9): S231– 7.

Richard J. Roberts, Mengfang Chen, Waste incineration—how big is the health risk? A quantitative method to allow comparison with other

health risks, *Journal of Public Health*, Volume 28, Issue 3, September 2006, Pages 261-266, <https://doi.org/10.1093/pubmed/fdl037>

Santoro M, Minichilli F, Linzalone N, Coi A, Maurello MT, Sallese D, et al. Adverse reproductive outcomes associated with exposure to a municipal solid waste incinerator. *Ann Ist Super Sanita*. 2016; 52(4): 576- 81.

Tait PW, Brew J, Che A, Costanzo A, Danyluk A, Davis M, et al. The health impacts of waste incineration: a systematic review. *Aust N Z J Public Health* 2020;44:40-8. <https://doi.org/10.1111/1753-6405.12939>.

Viel JF, Daniau C, Gorla S, Fabre P, de Crouy-Chanel P, Sauleau EA, et al. Risk for non-Hodgkin's lymphoma in the vicinity of French municipal solid waste incinerators. *Environ Health*. 2008; 7: 51.

Yamamoto K, Kudo M, Arito H, Ogawa Y, Takata T. A cross-sectional analysis of dioxins and health effects in municipal and private waste incinerator workers in Japan. *Ind Health*. 2015; 53(5): 465- 79.

Yamamoto K, Kudo M, Arito H, Ogawa Y, Takata T. Isomer pattern and elimination of dioxins in workers exposed at a municipal waste incineration plant. *Ind Health*. 2015; 53(5): 454- 64.

Yi SW, Ohrr H, Won JU, Song JS, Hong JS. Serum 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin levels and their association with age, body mass index, smoking, military record-based variables, and estimated exposure to Agent Orange in Korean Vietnam veterans. *J Prev Med Public Health*. 2013 Sep;46(5):226-36.

Yoshida R, Ogawa Y, Mori I, Nakata A, Wang R, Ueno S, et al. Associations between oxidative stress levels and total duration of engagement in jobs with exposure to fly ash among workers at

municipal solid waste incinerators. *Mutagenesis*. 2003; 18(6): 533- 7.

Zambon P, Ricci P, Bovo E, Casula A, Gattolin M, Fiore AR, et al. Sarcoma risk and dioxin emissions from incinerators and industrial plants: A population-based case-control study (Italy). *Environ Health*. 2007; 6: 19.

Abstract

A Research on Harmful Factors and their Health Effects in Municipal Waste Incinerator workers.

Objectives : Municipal waste incineration(MWI) facilities are important facilities for waste disposal in modern society. However, harmful factors that can occur during incineration, causing distrust among local residents. Few researches have been conducted on MWI workers working closer to incineration facilities than local residents. Therefore, through this study, we aimed to analyze the harmful factors of incinerators that can be exposed to incinerator workers.

Method : At the main points of the three incinerators, dioxin, PAHs, and heavy metals, such as cadmium, lead, were measured, and 68 workers were identified with PAHs metabolites, heavy metals, and phthalates. Blood dioxin was measured for 10 workers.

Results : Areal dioxin was measured to be 0.550–0.989pg I–TEQ/Sm³. This was close to or exceeding the environmental standard of 0.6pg I–TEQ/Sm³. As for the measurement results of

total dust, heavy metals, and organic solvents, items exceeding the working environment standards were not identified. In the case of PAHs, the overall concentrations was higher than the atmospheric level in the industrial complex area, and benzo (a)pyrene was also 5.37ng/m^3 at some points, significantly exceeding the EU standard (1ng/m^3) or WHO standard (0.12ng/m^3).

In three incinerators, a total of 68 workers' heavy metals in the body (lead in yaw, cadmium, mercury), PAHs metabolites, 8-OHdG, and phthalates were analyzed. PAHs metabolites and phthalates were not significantly higher compared to past studies or the general population. There were no results that exceeded the exposure standards for heavy metals, but higher levels of results were confirmed compared to the general population of the National Health Survey.

The total concentration of dioxin in the blood was ranged from 2.184 to 9.134 pg TEQ/g-lipid, with an average of 5.230 pg TEQ/g-lipid and a median of 5.063 pg TEQ/g-lipid. The total dioxin concentration was not significantly different between incinerator workers and nearby residents, but when looking at the properties of the homogeneous, there was a difference in concentration of 2,3,7,8-TCDD by more than 14 times.

Conclusion : We observed moderate level of dioxins in MWIs, and other harmful factors. Close monitorings and further evaluations are required to protect MWI workers.

Key words : MWI, Dioxin, PAH

부록

부록 1: 설문지

I. 연구 대상자 일반 특성 설문 조사

※소변 검체 번호 :

1. 귀하의 성별은? ☐남 ☐여
2. 몇 년 생이십니까? _____년 생
3. 귀하의 결혼유무에 대해 골라주십시오. (선택질문)
 - 1) 미혼
 - 2) 기혼
 - 3) 기타(이혼, 사별 등)
4. 귀하의 최종 학력에 대해 골라주십시오.
 - 1) 중학교 졸업 이하
 - 2) 고등학교 졸업
 - 3) 대학교 졸업
 - 4) 대학원 졸업
5. 귀하의 월평균 가구소득을 골라주십시오.
 - 1) 200만원 미만
 - 2) 200-300만원 미만
 - 3) 300-400만원 미만

- 4) 400-500만원 미만
- 5) 500-600만원 미만
- 6) 600-700만원 미만
- 7) 700만원 이상

6. 다음은 최근 1년 동안의 음주(술) 경험에 대한 질문입니다.

6-1. 술을 얼마나 자주 마십니까?

- ☐① 최근 1년간 전혀 마시지 않았다 (7번으로 이동해주시십시오.)
- ☐② 한달에 1번 미만
- ☐③ 한달에 1번 정도
- ☐④ 한달에 2~4번
- ☐⑤ 일주일에 2~3번 정도
- ☐⑥ 일주일에 4번 이상

6-2. 한 번에 술을 얼마나 마십니까?

※ 소주 양주 구분 없이 각각의 술잔으로 계산합니다 단 캔맥주 1개 (355cc)는 맥주 1.6잔과 같습니다

- ☐① 1-2잔
- ☐② 3-4잔
- ☐③ 5-6잔
- ☐④ 7-9잔
- ☐⑤ 10잔 이상

6-3. 한번의 술자리에서 7잔(또는 맥주 5캔 정도) 이상을 마시는 횟수는 어느정도입니까?

- ☐① 전혀 없다
- ☐② 한달에 1번 미만

- ☐③ 한달에 1번 정도
- ☐④ 일주일에 1번 정도
- ☐⑤ 거의 매일

7. 현재 담배를 피우십니까?

- ☐①  피움 (8번에 응답해 주십시오)
- ☐②  과거에는 피웠으나 현재 피우지 않음. (9, 10번에 응답해 주십시오)
- ☐③  담배를 피우지 않았음 (11번으로 가세요)

8. 하루 평균 흡연량 □□□ 개비

흡연기간은 □□년 □□개월

9. 과거 흡연기간은 □□년 □□개월

10. 과거 담배를 피울 때 하루 평균 흡연량은 □□□개비

11. 평소 돼지고기 소고기 등을 숯불에 구워서 얼마나 자주 드십니까?

- ☐① 거의 먹지 않는다 ☐② 월 1-2회 정도
- ☐③ 주 1회 ☐④ 주 2-3회
- ☐⑤ 주 4-5회 ☐⑥ 매일

II. 일반적 건강수준

다음은 근로자들의 일반적인 건강수준에 대한 질문입니다 해당되는 곳에 응답하여 주십시오.

1. 평소 당신의 건강 상태는 어떻다고 생각하십니까?

☐① 매우 좋다 ☐② 약간 좋다 ☐③ 보통이다 ☐④ 약간 나쁘다 ☐⑤ 매우 나쁘다

2. 작년과 비교하여, 현재의 당신의 건강은 어떤 상태라고 생각하십니까?

☐①작년보다 훨씬 낫다 ☐② 작년보다 조금 낫다
☐③작년과 비슷하다 ☐④ 작년보다 조금 나빠졌다
☐⑤작년보다 많이 나빠졌다

3. 다음은 평상시 당신의 활동에 관한 항목들입니다.

이러한 활동을 할 때 지장이 있으십니까? 있다면 어느 정도입니까?

문 항	지장이 많이 있다	지장이 약간 있다	지장이 거의 없다
1) 달리기, 무거운 물건 들어올리기, 격렬한 운동을 할 때	1	2	3
2) 탁자 옮기기, 집안 청소, 배드민턴 치기	1	2	3
3) 시장 보기	1	2	3
4) 한꺼번에 두세 계단씩 오르기	1	2	3
5) 한 계단씩 오르기	1	2	3
6) 구부리기, 무릎꿇기	1	2	3
7) 4~5리(1km) 정도 걷기	1	2	3
8) 마을 주변 산책, 동네 한바퀴 걷기	1	2	3
9) 집주변 걷기	1	2	3
10) 혼자서 목욕이나 옷 입기	1	2	3

4. 지난 한달 간 당신의 신체적인 어려움으로 일상생활이나 직장에서 다음과 같은 어려움이 있었습니까?

문항	예	아니오
1) 일하는 시간을 줄여야만 했다	1	2
2) 원하는 만큼 일을 하지 못했다	1	2
3) 어떤 일을 할 때 힘이 들 때가 있었다.	1	2
4) 대부분의 일을 할 때 어려움이 있었다.	1	2

5. 지난 한달 간 감정적인 어려움으로 일상생활이나 직장에서 다음과 같은 어려움이 있었습니까?

문항	예	아니오
1) 일하는 시간을 줄여야만 했다	1	2
2) 원하는 만큼 일을 하지 못했다	1	2
3) 보통 때만큼 일에 집중할 수 없었다.	1	2

6. 지난 한달 간 신체상의 어려움이나 감정상의 어려움으로 사회생활(가족 간 친구 간 이웃 간)에 어려움이 있었다면 어느 정도 입니까?

- ☐① 어려움이 전혀 없었다 ☐② 어려움이 대부분 없었다
☐③ 어려움이 이따금 있었다 ☐④ 대부분 어려움이 있었다
☐⑤ 항상 어려움이 있었다

7. 지난 한달간 당신의 신체적인 아픔은 어느 정도였습니까?

- ☐① 전혀 없었다 ☐② 거의 없었다 ☐③ 약간 있었다
☐④ 보통이었다 ☐⑤ 심했다 ☐⑥ 매우 심했다

8. 신체적 아픔으로 인해 정상적인 생활에 지장이 있었습니까?

- ☐① 전혀 없었다 ☐② 약간 있었다 ☐③ 보통이었다

☐④많았다 ☐⑤매우 많았다

9. 다음의 질문들은 지난 한달 간 여러분이 어떻게 느꼈고 어떤 일이 있었는지에 관한 것입니다.

문항	항상 그렇다	대부분 그렇다	자주 그렇다	가끔 그렇다	거의 없었다	전혀 없었다
1) 나는 의욕이 넘쳤다	1	2	3	4	5	6
2) 나는 신경질적이었다	1	2	3	4	5	6
3) 나는 의기소침했었다	1	2	3	4	5	6
4) 나는 안정되고 평온했다	1	2	3	4	5	6
5) 나는 힘이 넘쳤다	1	2	3	4	5	6
6) 나는 우울하고 상심했었다	1	2	3	4	5	6
7) 나는 지쳤었다	1	2	3	4	5	6
8) 나는 행복했었다	1	2	3	4	5	6
9) 나는 피곤했었다	1	2	3	4	5	6

10. 지난 한달 간 몸이 불편하다든지 아니면 기분이 내키지 않아서 친척이나 친구 등을 방문 하는 것과 같은 일들을 하는데 어려움이 있었다.

☐①항상 그렇다 ☐②대부분 그렇다 ☐③가끔 그렇다

☐④거의 그렇지 않다 ☐⑤ 전혀 그렇지 않다

11. 다음의 질문에 대해 답해 주십시오.

문항	확실히 그렇다	그런 것 같다	모르겠 다	그런 것 같지 않다	전혀 그렇지 않다
1) 나는 다른 사람들보다 더 쉽게 병에 걸리는 것 같다.	1	2	3	4	5
2) 나는 누구보다도 건강하다	1	2	3	5	5
3) 나의 건강은 점점 나빠질 것이다	1	2	3	4	5
4) 나의 건강상태는 매우 좋다	1	2	3	4	5

III. 작업특성

1. 현 근무지는 어디 입니까?

2. 현 직종 근무기간은 얼마입니까?

_____년 _____개월

3. 현재의 업무는 주로 무엇입니까?

☐① 소각장 현장업무(로컬)

☐② 크레인실

☐③ 중앙제어실

☐④ 유지보수(공무)

☐⑤ 사무직

☐⑥ 기타

4. 타 업종에 근무하신 적이 있습니까?

업종 _____

_____년 _____개월

5. 현재의 작업환경에 대해서 만족하고 계십니까?

- ☐① 크게 만족한다 ☐② 만족하는 편이다
☐③ 그저 그렇다 ☐④ 불만이다
☐⑤ 크게 불만이다

6. 소각시설의 안전성에 대하여 어떻게 생각하십니까?

- ☐① 매우 신뢰 ☐② 조금 신뢰
☐③ 보통 ☐④ 조금 신뢰하지 않는다
☐⑤ 매우 신뢰하지 않는다 ☐⑥ 잘 모르겠다

IV. 작업환경 인지도

7. 귀사의 사업주는 근로자의 건강장해 예방 및 작업 환경개선에 대한 관심도가 어느 정도라고 생각하십니까?

- ☐① 매우 높은 편이다. ☐② 높은 편이다.
☐③ 보통이다. ☐④ 낮은 편이다.
☐⑤ 매우 낮은 편이다.

8. 귀하는 업무 중 발생하는 유해물질 및 작업환경에 관해 안전보건교육을 받은 적이 있습니까?

- ☐① 받은 적이 없다. ☐② 월 1회 이상 받는다
☐③ 1년 1회 받는다. ☐④ 2-3년에 한번 받는다

9. 다음의 물질들 중 귀하의 작업환경과 관련이 있다고 생각되는 물질들을 모두 고르세요.

- ☐① 다이옥신
☐② 방향족다환탄화수소류(PAH)
☐③ 납, 카드뮴, 수은 등 중금속
☐④ 분진

10. 귀하는 귀사에서 발생하는 유해물질에 대해 어느 정도 알고 있다고 생각합니까?

- ☐① 아주 잘 알고 있다.
- ☐② 어느 정도는 알고 있다.
- ☐③ 모르는 편이다
- ☐④ 거의 모른다.

11. 귀하께서 생각하시는 소각장 근무에서 가장 유해하거나 힘든 요인을 적어주십시오.(복수응답 가능)

- ☐① 냄새, 악취
 - ☐② 분진
 - ☐③ 불안, 우울 등 심리적 요인
 - ☐④ 교대근무
 - ☐⑤ 허리, 목, 어깨 관련 근골격계 질환
- 기타 : _____

V. 우울정도

귀하는 지난 2주간, 얼마나 자주 다음과 같은 문제들로 곤란을 겪으셨습니까?

1. 기분이 가라앉거나, 우울하거나, 희망이 없다고 느꼈다.

- 1) 없음
- 2) 2-6일
- 3) 7-12일
- 4) 거의 매일

2. 평소 하던 일에 대한 흥미가 없어지거나 즐거움을 느끼지 못했다.

- 1) 없음
- 2) 2-6일
- 3) 7-12일
- 4) 거의 매일

3. 잠들기가 어렵거나 자주 깼다/혹은 너무 많이 잤다.

- 1) 없음
- 2) 2-6일
- 3) 7-12일
- 4) 거의 매일

4. 평소보다 식욕이 줄었다/혹은 평소보다 많이 먹었다.

- 1) 없음
- 2) 2-6일

3) 7-12일

4) 거의 매일

5. 다른 사람들이 눈치 챌 정도로 평소보다 말과 행동이 느려졌다/ 혹은 너무 안절부절 못해서 가만히 앉아 있을 수 없었다.

1) 없음

2) 2-6일

3) 7-12일

4) 거의 매일

6. 피곤하고 기운이 없었다.

1) 없음

2) 2-6일

3) 7-12일

4) 거의 매일

7.내가 잘못 했거나, 실패했다는 생각이 들었다/ 혹은 자신과 가족을 실망시켰다고 생각했다.

1) 없음

2) 2-6일

3) 7-12일

4) 거의 매일

8. 신문을 읽거나 TV를 보는 것과 같은 일상적인 일에도 집중 할 수가 없었다.

- 1) 없음
- 2) 2-6일
- 3) 7-12일
- 4) 거의 매일

9. 차라리 죽는 것이 더 낫겠다고 생각했다/혹은 자해할 생각을 했다.

- 1) 없음
- 2) 2-6일
- 3) 7-12일
- 4) 거의 매일

연구진

연구기관: 영남대학교

연구책임자: 박철용 (조교수, 영남대학교)

연구원: 사공준 (교수, 영남대학교)

연구원: 백기욱 (전임의, 고려대학교안산병원)

연구원: 팍경민 (임상교수, 고려대학교안산병원)

연구원: 김승남 (팀장, 고려대학교안산병원)

연구원: 손수호 (전공의, 영남대학교병원)

연구원: 조성민 (전공의, 영남대학교병원)

연구원: 배성진 (전공의, 영남대학교병원)

연구원: 김민균 (전공의, 영남대학교병원)

연구상대역: 최영화 (대리, 산업안전보건연구원)

연구기간

2021. 04. 27. ~ 2021. 10. 31.

본 연구는 산업안전보건연구원의 2021년도 위탁연구 용역사업에 의한
것임

본 연구보고서의 내용은 연구책임자의 개인적 견해이며,
우리 연구원의 공식견해와 다를 수도 있음을
알려드립니다.

산업안전보건연구원장

폐기물 소각장 근로자의 유해요인과 건강영향조사
(2021-산업안전보건연구원-700)

발 행 일 : 2021년 10월 31일

발 행 인 : 산업안전보건연구원 원장 김은아

연구책임자 : 영남대학교 의과대학 조교수 박철용

발 행 처 : 안전보건공단 산업안전보건연구원

주 소 : (44429) 울산광역시 중구 종가로 400

전 화 : 052-703-0876

팩 스 : 052-703-0336

Homepage : <http://oshri.kosha.or.kr>