

(재)공공상생연대기금 2025년 노동 연구 지원사업

인도네시아 여성 폐기물 수거 노동자(Waste Pickers)의
플라스틱 유래 유해물질 노출 평가

연 구 보 고 서

2025. 12.



(재)공공상생연대기금



노동환경건강연구소

제 출 문

재단법인 공공상생연대기금 이사장 귀하

본 보고서를 “인도네시아 여성 폐기물 수거 노동자(Waste Pickers)의
플라스틱 유래 유해물질 노출 평가” 최종보고서로 제출합니다.

2025년 11월 28일

연구수행기관: 노동환경건강연구소

연구기간 : 2025. 1. 17 ~ 2025. 11. 28

연구책임자 : 김 원 소장

보고서 요약서

연구사업명	(재)공공상생연대기금 노동 연구 지원사업
연구과제명	인도네시아 여성 폐기물 수거 노동자(Waste Pickers)의 플라스틱 유래 유해물질 노출평가
연구책임자	김원 소장
연구수행기관	노동환경건강연구소
요약문	<ul style="list-style-type: none"> - 본 연구는 인도네시아 그레식(Gresik) 지역의 여성 폐기물 노동자(Waste Worker)¹⁾가 플라스틱 폐기물에서 유래하는 유해화학물질에 구조적으로 노출되는 현실을 규명하고, 이들의 건강권 보호 및 근로조건 개선을 위한 정책적 근거를 마련하기 위해 수행되었다. - 이를 위해 Ngipik·Wringinanom 폐기물 처리장(TPS)에서 근무하는 여성 폐기물 노동자 27명과 대조군 8명을 대상으로 혈액·소변을 채취하여 프탈레이트, 비스페놀류, 난연제(OPFR), 과불화화합물(PFAS), 중금속, 다환방향족탄화수소(PAH) 등 65종 유해물질의 체내 농도를 분석하는 바이오모니터링 연구를 실시하였다. 또한 인구학적 정보, 작업환경, PPE 사용, 가정 기반 소각 여부 등을 포함한 설문조사를 병행해 직업적·비직업적 노출 요인을 종합적으로 평가하였다. - 분석 결과, 여성 폐기물 노동자는 특정 유해물질에 대한 직업적 노출이 확인되었다. 플라스틱 가소제 성분인 DEHP, 유기인계 난연제, 다환방향족탄화수소 등 폐기물 처리 과정에서 발행하는 플라스틱 유래 화학물질에 대한 직접적인 노출을 확인하였다. 이러한 결과는 폐기물 처리 작업이 유해화학물질의 체내 축적 위험을 증가시킬 수 있으며, 내분비계 교란, 발암성 등과 같은 건강 영향의 위험이 존재함을 강력히 시사한다. - 본 연구는 플라스틱 내 유해화학물질 규제 강화, 폐기물 소각 금지, 유기성 폐기물 분리 의무화, 여성 노동자 작업환경 개선(PPE·세척시설·안전한 작업공간), 지방정부 협력 기반의 모니터링 체계 구축 등 정의로운 전환(Just Transition)을 위한 정책 개선의 과학적 근거를 제공한다. 또한 WIOEH-ECOTON-Airlangga University 간 협력 구조를 강화하며 향후 지역 확장·장기 모니터링 체계 구축을 위한 기반을 마련하였다.
핵심어 (5개 이내)	바이오모니터링, 폐기물노동자, 플라스틱 유래 유해화학물질, 인도네시아

1) 사업 제안서 제출 당시 폐기물 수거 노동자(Waste Picker)를 대상으로 하였으나 대상자 모집 과정에서 보다 공식적인 노동을 생계로 하는 폐기물 노동자(Waste Worker)로 진행함.

I. 요약문

1. 제목

인도네시아 여성 폐기물 수거 노동자(Waste Pickers)의
플라스틱 유래 유해물질 노출평가

2. 연구의 배경 및 목적

플라스틱 생산량이 폭발적으로 증가하면서 플라스틱 폐기물에서 유래하는 내분비계 교란물질(EDCs), 중금속, 난연제, PFAS, PAHs 등 유해화학물질이 전 세계 노동자·지역 주민의 건강에 중대한 영향을 미치고 있다. 특히 중국의 폐플라스틱 수입 금지 이후, 인도네시아를 포함한 동남아 국가들이 주요 폐기물 도착지가 되면서, 플라스틱 폐기물로 인한 오염 부담이 글로벌 남반구로 구조적으로 전가되고 있다.

그레식(Gresik)은 인도네시아 내 플라스틱·종이 재활용 산업이 고도로 집적된 지역으로, 수입 폐기물이 대량으로 유입·처리되는 대표 지역이다. 이 과정에서 발생하는 개방형 소각, 불완전연소, 혼합폐기물 불법 투기 등은 지역 주민과 폐기물 노동자의 건강위험을 심화시키고 있다.

폐기물 수거 노동 중에서도 특히 여성 노동자의 위험은 구조적으로 과소평가되고 있다. 여성은 주로 플라스틱 필름, PET, 비닐, 금속 등 오염된 재질을 맨손에 가까운 상태로 세부 분리하는 작업에 집중되어 있어, 중금속과 EDCs의 직접 접촉·흡입·경피 노출 가능성이 남성보다 높다. 또한 대부분이 15~49세 가임기 여성으로 구성되어 생식·호르몬 건강의 영향이 특히 중요하다.

기존 연구는 근골격계 통증·감염성 질환·호흡기 문제 등 ‘건강문제 현황’만을 다루었으나, 체내에 실제로 어떤 유해물질이 축적되었는지 확인하는 바이오모니터링 연구는 거의 존재하지 않았다. 따라서 본 연구는 ① 인도네시아 그레식 여성 폐기물 노동자의 플라스틱 유래 유해물질 노출 실태를 과학적으로 규명하고, ② 정책적·제도적 개입 근거를 마련하며, ③ 폐기물 노동자의 건강권 보호와 정의로운 전환(Just Transition)을 촉진하기 위한 기반을 구축하는 것을 목적으로 수행되었다.

3. 연구방법 및 내용

가. 연구 설계

본 연구는 인도네시아 동자바 그레식(Gresik) 지역의 Ngipik 및 Wringinanom 폐기물 처리장(TPS)에서 일하는 여성 폐기물 노동자를 대상으로, 플라스틱 유래 유해화학물질의 체내 축

적 수준을 확인하기 위해 설계된 바이오모니터링 기반 건강영향 조사이다. 총 26명의 여성 폐기물 노동자와 5명의 지역 대조군을 연구대상으로 하여 혈액·소변 시료를 채취하고, 프탈레이트 대사체, 환경성 폐놀류(BPA 등), PFAS, 유기인계 난연제(OPFR), 중금속 등 주요 유해물질의 체내 농도를 분석하였다. 더불어 인구학적 특성, 건강 이력, 작업환경, PPE 사용 여부, 가정 기반 소각 등 직업·비직업적 요인을 포함한 설문조사를 병행함으로써, 여성 노동자가 직면한 다층적 노출 구조를 통합적으로 평가할 수 있도록 연구를 구성하였다.

나. 조사지역 및 연구대상 선정

조사지역은 재활용 산업이 밀집해 있고 개방형 소각이 빈번하며 비공식 폐기물 노동자의 주거지역이 인접한 그레식 지역의 특성을 고려해 선정하였다. ECOTON이 지역 커뮤니티와 긴밀한 협력관계를 기반으로 연구참여자를 모집함으로써, 참여자의 자발성과 연구의 안전성을 확보하였다.

다. 현지 샘플링 절차

현지 샘플링 과정에서는 노동환경건강연구소 연구진이 직접 출장을 통해 표준절차서(SOP)에 따른 시료 채취가 적정하게 이루어지고 있는지 점검하였다. 시료 전처리 및 보관은 ECOTON과 Airlangga University 의대, 지역 보건소의 실험 인프라를 활용해 수행되었으며, 동시에 참가자 설문을 병행하여 직업적·비직업적 노출 요인을 세밀하게 파악하였다.

라. MTA를 통한 시료 이동 및 시료 분석

한편, 현지 입국 과정에서 샘플링 도구 일부가 인도네시아 세관에 의해 압류되었고, 시료 반출 단계에서도 동일한 문제가 발생할 가능성이 제기되었다. 이에 따라 연구팀은 Airlangga University와의 협력하에 Material Transfer Agreement(MTA)를 신속히 마련하고 인도네시아 보건부의 승인을 받아 안전한 시료 이동 체계를 구축하였다. 승인 절차를 거쳐 시료는 최종적으로 한국으로 안전하게 반입되었고, 노동환경건강연구소 분석팀이 국제적 품질관리 기준에 따라 총 65 종 유해물질에 대한 정밀 분석을 수행하였다.

4. 연구결과

이번 연구는 작업환경에서 여성 폐기물 노동자의 플라스틱 유래 화학물질에 대한 체내 노출을 바이오모니터링을 통해 직접적으로 확인하였다. 인도네시아 여성 폐기물 노동자 27명 그리고 일반 여성 5명 등 32명의 혈액과 소변에서 중금속, 프탈레이트, 환경성폐놀, 유기인계난연제, 다환방향족탄화수소 그리고 과불화화합물 등 6개 화학물질군 총 65종을 분석하였다. 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 여성 폐기물 노동자와 일반 여성 모두의 소변 및 혈액에서 납(Pb), 카드뮴(Cd), 크롬(Cr) 및 니켈(Ni), 프탈레이트 대사체 6종(MEP, MnBP, MEHP, MEHHP, MEOHP 및 MECPP), 환경성 페놀 1종(Me-P), 다환방향족탄화수소 대사체 4종(2-OH-NAP, 1-HO-PHE, 2-OH-PHE 및 1-HO-PYR) 그리고 과불화화합물 4종(PFOA, PFNA, PFHxS 및 PFOS) 등 23종은 100% 검출되었다. 결과적으로 다양한 화학물질이 일반인 뿐만 아니라 폐기물 노동자의 체내에서도 광범위하게 존재하고 있음을 의미하며, 일상적인 생활환경에서의 노출과 직업적 노출이 동시에 작동할 수 있음을 시사한다.

둘째, 바이오모니터링 결과를 통해 여성 폐기물 노동자들은 플라스틱에서 유래되는 화학물질에 직업적으로 노출되고 있음을 확인하였다. 특히 소변 중 DEHP(플라스틱 가소제)와 유기인계 난연제의 농도가 유의하게 높게 나타났으며, 플라스틱을 소각하는 과정에서 발생하는 다환방향족탄화수소 지표물질인 1-OH-Pyrene 또한 여성 폐기물 노동자에서 더 높은 농도로 검출되었다. 이러한 결과는 폐기물 처리 작업이 화학물질의 체내 축적 위험을 증가시킬 수 있음을 시사한다.

셋째, 본 연구는 시료 규모가 적은 한계 때문에 식습관이나 생활습관 등 개별 요인을 활용한 영향요인 분석에 충분히 활용하지 못하였다. 중금속이나 비스페놀 화합물 등의 결과를 보다 포괄적이고 정밀하게 해석하는 데 있어서 제약이 있었다. 그럼에도 불구하고 이번 결과는 인도네시아 여성 폐기물 노동자의 화학물질에 대한 체내 축적을 확인한 과학적인 증거를 제시하였다는 점에서 중요한 의의를 갖는다.

5. 기대효과 및 활용계획

본 연구는 인도네시아 그레식 지역 여성 폐기물 노동자의 플라스틱 유래 유해화학물질 노출 실태를 국내 최초로 바이오모니터링 방식으로 규명하였다는 점에서 중요한 의의를 가진다. 특히 프탈레이트, BPA, 난연제, PFAS, 중금속 등 플라스틱 기반 유해물질의 체내 축적 가능성을 검토한 본 연구의 결과는 여성 노동자의 건강권 보호를 위한 제도적 개입의 필요성을 과학적으로 뒷받침한다. 이러한 분석 결과는 폐기물 처리 과정에서 구조적으로 반복되는 노출 위험을 근본적으로 줄이기 위한 지역·국가·국제적 정책 마련의 근거로 활용될 수 있다.

첫째, 본 연구는 플라스틱 내 유해첨가제 규제 강화와 폐기물 소각 금지, 유기성 폐기물 분리의무화 등 인도네시아의 폐기물·화학물질 관리 정책 개선에 직접적인 시사점을 제공한다. 체내 농도 분석을 통해 여성 노동자가 고위험 유해물질에 노출되고 있음을 확인함으로써, 재활용 산업 전반에서의 안전한 작업환경 구축, PPE 지급 및 세척시설 확보, 가정 기반 비공식 소각 금지 등 구체적 노동 보호 정책을 제안할 수 있다. 이는 폐기물 수거 과정에 참여하는 여성, 특히 가임

기 여성의 생식·호르몬 건강 보호에 중요한 기반이 된다.

둘째, 본 연구는 국제사회에서 논의 중인 국제 플라스틱 협약(Global Plastics Treaty) 협상 과정에도 활용 가능하다. 플라스틱 오염의 피해가 남반구 여성에게 집중되고 있음을 보여주는 본 연구의 결과는, 유해화학물질 첨가제 규제 및 플라스틱 전주기 감축 요구를 강화하는 근거 자료로 활용될 수 있다. ECOTON·WIOEH·Airlangga University·IPEN SEA Hub 간 협력 구조는 해당 연구 결과를 국제회의에서 발표하고 국제 시민사회 행동으로 확장하는 중요한 플랫폼이 될 것이다.

셋째, 본 연구는 지역사회와 지방정부의 정책 개선을 촉진하는 실질적 자료로 활용될 수 있다. 향후 ECOTON이 주관하는 현지 설명회와 지방정부 간담회에서 연구결과를 공유함으로써, 그레식 지역의 폐기물 처리행정 개선, 재활용 산업 관리 강화, 개방형 소각 금지, 여성 노동자 건강 모니터링 등 정책 환류가 가능하다. 특히 폐기물 노동자의 건강영향이 과학적 수치로 제시됨에 따라, 지방정부와의 협업을 통한 현장 안전점검 및 제도적 보호 조치 마련이 용이해질 것이다.

넷째, 본 연구를 통해 구축된 MTA, 협력 네트워크, 샘플링 프로토콜, 분석 체계는 향후 인도네시아 내 타 지역 또는 한국·동남아시아 국가로 연구를 확장할 수 있는 기반을 제공한다. 또한 장기적인 바이오모니터링 체계를 구축하여, 폐기물 노동자의 유해물질 노출 추세를 지속적으로 파악하고 정책의 효과를 평가하는 데에도 활용할 수 있다.

마지막으로, 본 연구는 폐기물 노동자의 건강권 보장과 정의로운 전환(Just Transition)을 실현하기 위한 시민사회·학계·정부 간 다자 협력의 모델을 제시한다. 여성 폐기물 노동자가 처한 구조적 노출과 취약성을 드러내고, 이를 해결하기 위한 법·제도·작업환경·사회적 안전망 강화 방안을 구체적으로 제안함으로써, 노동자의 안전과 존엄을 중심에 둔 정의로운 전환을 촉진하는 실질적 기반을 마련하였다

목 차

I. 요약문	iv
II. 연구 배경 및 목적	1
1. 연구 배경	1
2. 연구 목적	3
3. 추진 체계	4
4. 연구팀 구성	6
5. 연구 수행 일정	7
III. 연구 방법	8
1. 조사지역 및 연구 대상	8
2. 윤리심의위원회 심의 및 승인 (IRB)	13
3. 분석 대상 물질	13
IV. 연구 내용	15
1. 현장 샘플링	15
2. 시료 반출 및 이송	19
3. 시료 분석 및 결과	20
V. 연구 결과	30
1. 연구참여자의 인구학적 특징	30
2. 바이오모니터링 결과	31
3. 결론 및 제안	44
VI. 기대효과 및 활용방안	46
1. 분석 결과 리뷰 및 공유	46
2. 연구 결과 활용 계획	46
3. 기대효과	49
VII. 부록	52
1. 참고문헌	52

<표 차례>

<표 1> 연구 필요성과 목적	4
<표 2> 연구진 기본 정보	6
<표 3> 연구 일정	7
<표 4> 샘플 대상 및 규모	9
<표 5> 현지 출장 및 샘플링 일정	15
<표 6> 혈액 및 소변 중 CRM 분석 결과 (단위: ug/L)	21
<표 7> 소변 중 프탈레이트 대사체 분석을 위한 LC-MS/MS조건	22
<표 8> 프탈레이트 대사체 정확도, 정밀도 및 검출한계	23
<표 9> 소변 중 환경성 페놀 분석을 위한 LC-MS/MS 조건	23
<표 10> G-EQUAS 74회 및 SRM 3673 중 환경성 페놀 분석결과 (단위: $\mu\text{g}/\text{L}$)	24
<표 11> 소변 중 유기인계 난연제 대사체 분석을 위한 LC-MS/MS 조건	25
<표 12> 유기인계 난연제 정확도, 정밀도 및 검출한계 (단위: $\mu\text{g}/\text{L}$)	26
<표 13> 소변 중 다환방향족탄화수소 대사체 분석을 위한 LC-MS/MS 조건	26
<표 14> 다환방향족탄화수소 대사체 정확도, 정밀도 및 검출한계 (단위: $\mu\text{g}/\text{L}$)	27
<표 15> 혈청 중 과불화화합물 분석을 위한 LC-MS/MS조건	27
<표 16> PFASs 정확도, 정밀도 및 검출한계 (단위: $\mu\text{g}/\text{L}$)	28
<표 17> 대상군 및 대조군의 인구학적 특징	30
<표 18> 대상군의 직업적 특성	31
<표 19> 대상군(N=27)과 대조군(N=5)에서 분석대상물질의 농도 분포	32
<표 20> 대상군과 대조군의 중금속 농도 비교	38
<표 21> 대상군과 대조군의 소변 중 프탈레이트 대사체 농도 비교	39
<표 22> 작업에 따른 소변 중 MEHHP(DEHP 주요 대사체)에 대한 바이오모니터링 연구	40
<표 23> 대상군과 대조군의 비스페놀, 항균제, UV-안정제 및 파라벤 농도 비교	41
<표 24> 대상군과 대조군의 소변 중 유기인계난연제 대사체 농도 비교	42
<표 25> 대상군과 대조군의 소변 중 다환방향족탄화수소 대사체 농도 비교	43
<표 26> 대상군과 대조군의 혈액 중 과불화화합물 농도 비교	44
<표 27> 언론보도 기사	47
<표 28> 웨비나 발표 구성	47

<그림 차례>

[그림 1] 연구 조직도 및 추진 체계	5
[그림 2] 연구진 역할 및 분담 내용	6
[그림 3] 연구 대상 지역 및 협업 보건소 위치	8
[그림 4] Wringinanom 폐기물 처리장 전경-1	9
[그림 5] Wringinanom 폐기물 처리장 전경-2	10
[그림 6] Wringinanom 폐기물 처리장 전경-3	10
[그림 7] Ngipik 폐기물 처리장 전경 - 1	11
[그림 8] Ngipik 폐기물 처리장 전경 - 2	11
[그림 9] Ngipik 폐기물 처리장 전경 - 3	12
[그림 10] 시료 샘플링 방법	12
[그림 11] 바이오모니터링을 통한 분석대상 물질	14
[그림 12] 이해관계자 간담회 및 설명회	16
[그림 13] Sangkapura 보건소	16
[그림 14] Sangkapura 보건소 시료 분주 작업	17
[그림 15] SD Islamic Terpadu Al-Huda 초등학교	17
[그림 16] Pengolahan Recovery Center (자원 회수 시설)	18
[그림 17] Ngipik Landfill 배치도	18
[그림 18] Industri 보건소 시료 분주 작업	19
[그림 19] Ngipik Landfill 시설 견학	19
[그림 20] 유도결합플라즈마 질량분석기	20
[그림 21] LC-MS/MS (LC-30AD /LC-MS8050, Shimadzu, Japan)	22
[그림 22] LC-MS/MS (LC-MS 8060, Shimadzu, Japan)	25
[그림 23] 언론보도 기사 캡처	47
[그림 24] 국제웨비나 홍보 포스터	48
[그림 25] 웨비나 발표자 발표내용 캡처	48

II. 연구 배경 및 목적

1. 연구 배경

1.1. 플라스틱 유래 유해물질로 인한 폐기물 노동자의 건강 위협

1) 플라스틱에 사용되는 4,200여개의 유해물질

- 플라스틱은 제조 및 가공 과정에서 총 16,000여 종의 화학물질이 사용되며, 이 중 4,219 종은 발암성·돌연변이성·생식독성·내분비계 교란·특정장기독성 등 인체 유해성이 확인된 물질로 분류된다. 또한 약 1만여 종의 물질은 독성 정보조차 확보되지 않아, 현재 파악되는 위험성보다 더 큰 위해가 잠재되어 있을 가능성이 있다.

2) 폐기물 노동자의 플라스틱 유래 유해물질 장기간 노출로 인한 건강영향

- 기존 문헌에 따르면 폐기물 노동자들은 근골격계 질환, 호흡기 질환, 감염성 질환, 설사, 고혈압, 당뇨, 피부질환, 자상 및 화상 같은 사고성 손상 등 광범위한 건강 문제를 경험하고 있다. 남아프리카·브라질·몽골 등 다양한 지역 연구에서도 폐기물 노동자는 일반 인구 대비 1.5배 이상 높은 질병 위험, 반복적인 안전사고, 바이러스 감염, 과체중 및 비만 등의 건강위험이 지속적으로 보고되었다.

- 이러한 건강영향은 폐기물 더미에서 발생하는 생물학적·화학적 위해요인(미생물, 중금속, 유기화학물질, 연소 부산물 등)에 장기간 노출된 결과로 해석된다. 특히 플라스틱 수거·선별 과정에서는 프탈레이트, 비스페놀류, 난연제, 중금속과 같은 내분비계 교란물질(EDCs), 플라스틱 연소 시 발생하는 다환방향족탄화수소(PAHs) 등에 직접 노출될 수 있다.

- 그럼에도 불구하고 기존 연구는 폐기물 노동자들의 건강 문제를 근골격계 통증, 손상, 감염병, 호흡기 질환 등 ‘임상적 증상’ 중심으로 서술하는 데 그쳤고, 플라스틱에서 유래한 유해물질이 노동자의 체내에 얼마나 축적되어 있는지, 이러한 노출이 생식 건강·호르몬계·장기 기능에 어떤 영향을 미치는지 규명하지 못했다. 즉, 지금까지 환경적·작업환경적 노출 위험성을 지적해왔으나, 실제 체내 농도(biomonitoring)를 측정한 정량적 연구는 매우 제한적이었다.

- 따라서 플라스틱 유래 유해화학물질이 여성과 가임기 여성에게 미치는 영향을 규명하기 위해서는 기존의 건강 영향 조사에서 나아가 체내 축적 수준을 과학적으로 확인하는 바이오 모니터링 연구가 필수적이다. 본 연구는 이러한 공백을 해소하고, 폐기물 노동자 보호정책 마련을 위한 근거를 제공하기 위해 수행되었다.

1.2. 연구대상지역 인도네시아 그레식(Gresik)의 현황

1) 인도네시아의 폐기물 수입 구조와 규제 변화

- 인도네시아는 지난 10여 년간 글로벌 플라스틱 폐기물 이동의 주요 도착지 중 하나였다. 특히 중국의 2018년 폐플라스틱 수입 금지 이후, 동남아시아 전역으로 폐기물 흐름이 증가하면서 인도네시아는 미국·유럽 등지에서 오는 혼합 플라스틱 폐기물의 주요 수입국으로 부상하였다.
- 이에 따라 인도네시아 정부는 수입 규제 강화를 여러 차례 발표해 왔으며, 2025년 1월 1일부로 플라스틱 폐기물 수입 전면 금지를 공식 선언하였다. 단, 2025년 이전 발급된 유효 수입허가서는 만료일까지 유효해 실제 수입 중단까지는 일정한 시간이 필요하다.
- 하지만 공식 발표와는 다르게, 현장의 실제 폐기물 유입 상황은 통관 절차의 하점, 부패 구조, 수입 컨테이너 검사 인력 및 장비 부족으로 인해 플라스틱 폐기물이 ‘재활용 목적’ 또는 ‘혼합 자원’ 등으로 위장되어 지속적으로 유입될 가능성이 보고되고 있다. 이 때문에 정부 발표 이후에도 일정량의 플라스틱 폐기물이 인도네시아로 들어오고 있다는 시민사회·언론 보고가 반복된다.

2) 그레식(Gresik) 지역의 폐기물 수입 및 처리 실태

- 그레식(Gresik)은 동자바(East Java) 지역의 플라스틱·종이 재활용 산업 집적지로, 수입 폐기물이 선별, 재활용, 매립되는 핵심 지역이다. ECOTON의 조사에 따르면, 일부 재활용 공장은 재활용 불 가능한 잔재물을 무단 투기(dumping), 개방형 소각(open burning) 등으로 처리하고 있으며, 이는 주변 주거지와 노동환경에 중금속·유기오염물질·연소 부산물을 확산시키는 주요 원인이 된다.
- 또한 산업시설과 주거지가 밀집해 지역 주민과 노동자는 상시 노출 환경에 놓여 있으며, 비공식·가정 단위에서도 선별·소각이 이루어져 어린이 노출 가능성이 문제로 제기되고 있다. 그레식은 수입폐기물·불완전한 처리·비공식 노동·지역 내 오염이 결합된, 인도네시아 폐기물 문제의 축소판으로 평가된다.

1.3. 폐기물 처리과정의 위험이 개발도상국, 취약계층, 여성 노동자에게 집중되는 불공정 구조

1) 남반구에 집중되는 플라스틱 오염 부담

- 플라스틱 생산량은 지난 70년간 급격히 증가했으며, 생산량의 절반은 최근 13년간 집중된 것으로 보고된다. 생산된 플라스틱의 상당수는 단기간 내 폐기물로 전환되며, 각국의 처리 역량을 넘어서는 양은 해외로 수출되고 있다. 특히, 중국의 폐플라스틱 수입 금지 조치 이후 글로벌 폐기물 이동 경로가 변화하면서, 말레이시아·베트남·인도네시아 등 동남아시아 국가들이 주요 폐기물 수입지로 떠올랐다. 이들 국가는 재활용 기술·감독 체계가 취약해 플라스틱 소비 증가와 수입 폐기물이 결합한 이중 환경부담을 경험하고 있으며, 그 피해는 가장 취약한 노동자인 비공식 폐기물 노동자에게 집중된다.

2) 폐기물 노동자들의 어려운 경제상황과 위험한 작업환경

- 개발도상국 도시의 경우, 인구의 약 2% 정도가 청소 작업과 관련된 일로 근근이 연명한다고 추정되고 있다(Medina, 2007). 선진국에서는 폐기물 수거가 공적인 재순환 경제구조에 편입되어 있지만 개발도상국의 경우에는 비공식적인 경제영역에서 폐기물 수거가 상당부분 이루어지고 있다.
- 폐기물 노동자는 각 국가의 순환경에 기여하는 부분이 상당하지만 그들의 역할은 저평가되어 있다. 대부분 비공식 노동으로 분류되어 사회보험, 안전보건, 보호장치의 사각지대에 놓인다. 폐기물 수거는 시장에서 통용되는 기술이 없고 교육을 받지 못한 사람들 그리고 다른 수입원이 없는 사람들에게 중요한 경제적 기회를 제공하고 있다. 그러나 유해한 폐기물이 쌓인 작업환경은 폐기물 노동자들의 건강을 위협한다(Morais 등, 2022).

3) 가임기 여성 중심의 폐기물 수거 노동

- 폐기물 노동자들의 대부분은 여성 노동자들이다. 인도의 경우, 폐기물 노동자들이 약 400-500백만 명에 이르고 있고 그중에서 여성이 차지하는 비율이 약 80%라고 한다(Tupe, 2023). 그레식 지역의 폐기물 수거 노동은 남성과 여성 모두 수행하지만, 노동의 내용과 위험은 성별에 따라 뚜렷하게 분리되어 있다. 남성은 주로 대형 폐기물 운반, 기계 작업, 대규모 분류작업에 투입되지만, 여성은 주로 손으로 하는 세부 분류(플라스틱 필름, 병, 금속, 종이 등) 작업에 투입되어 오염된 폐기물 직접 접촉하게 된다. 여성 노동자는 대다수가 15-49세의 가임기 여성(reproductive-age women)이며, 폐기물에서 발생하는 내분비계 교란물질(PFAS, 프탈레이트, 비스페놀류), 난연제, 중금속(Cd, Pb) 등에 취약한 생물학적 특성을 갖고 있어 생식건강·호르몬계·임신 건강에 높은 위험을 가진다.

2. 연구 목적

본 연구는 인도네시아 동자바 그레식(Gresik) 지역의 여성 폐기물 노동자를 대상으로 플라스틱 유래 유해물질의 실제 체내 축적 수준을 규명하고, 이를 토대로 노동자 보호 및 제도 개선을 위한 과학적 근거를 제공하는 데 목적이 있다. 기존 연구가 노동자의 건강 문제를 주로 질병·사고 통계 중심으로 다루어, 체내 농도를 기반으로 한 정량적 노출평가가 미흡했던 점을 보완하기 위해 설계되었다. 본 연구의 구체적 목적은 다음과 같다.

2.1. 폐기물 노동자의 플라스틱 유래 유해물질 체내 축적 수준 규명(바이오모니터링)

- 플라스틱 제조·사용·폐기 과정에서 발생하는 **프탈레이트 대사체, 환경성 폐놀류(BPA 등), PFAS, 인산염계 난연제(OPFRs), 중금속(Cd, Pb 등)**을 중심으로 노동자의 신체(혈

액·소변)에서의 농도를 측정한다. 이를 통해 노동자가 실제로 어떤 유해물질에 노출되고 있는지, 어느 수준으로 축적되어 있는지를 정량적으로 파악한다. 특히 가임기 여성의 생식건강·호르몬계에 영향을 줄 수 있는 내분비계 교란물질(EDCs)을 중점적으로 분석한다.

2.2. 폐기물 노동자 보호를 위한 정책 및 제도 개선 방향 제시(정의로운 전환 기반)

- 바이오모니터링 결과와 현장조사에서 확인된 위험요인을 토대로, 인도네시아의 폐기물 관리체계에서 소외되어 있는 비공식·여성·가임기 노동자를 보호하기 위한 정책개입 및 제도 개선 방향을 제시한다.
- 이를 통해 플라스틱 오염이 노동자 건강에 미치는 영향을 근본적으로 완화하고, 인도네시아 폐기물 관리체계를 보다 안전하고 공정한 구조로 전환하는 데 필요한 근거자료를 제공하는 것을 최종 목표로 한다.

<표 1> 연구 필요성과 목적

문제	상황	목적
<ul style="list-style-type: none"> • 도시의 고형 폐기물 양이 점차 증가하고 있고 플라스틱은 그 중 세번째로 많은 12%를 차지하고 있음 • 플라스틱 생산이 급속하게 늘어나고 있고 그만큼 많은 폐기물이 발생하고 있어 일부는 개도국으로 수출됨 • 가난한 사람들이 특별한 기술이 필요 없는 폐기물 수거 노동자(waste picker)들이 되고 있음 • 여성이 대부분인 폐기물 노동자들이 열악한 작업환경에서 유해물질에 노출될 가능성이 매우 높음 	<ul style="list-style-type: none"> • 플라스틱에는 1.6만개의 화학물질이 사용되고 그 중에서 4.2천 개는 매우 유해한 물질로 분류됨 • 특히나, 환경호르몬과 같은 유해물질들이 플라스틱에 사용되고 있어 가임기 여성에게 더욱 위험할 수 있음 • 폐기물 노동자들이 열악한 작업환경으로 인해 다양한 질병에 걸리고 있다는 조사가 있음 • 그러나 주요 수거 대상이되는 플라스틱에서 유래되는 유해물질 노출에 대한자료는 거의 없음 	<ul style="list-style-type: none"> • 플라스틱 폐기물의 주요 수입국의 여성 폐기물 노동자들을 대상으로 플라스틱에서 유래하는 유해물질에 얼마나 많이 노출되고 있는지를 평가하고자 함 • 평가 결과는 폐기물 노동자들의 정의로운 전환을 위한 과학적인 근거로 활용될 수 있을 것으로 기대됨

3. 추진 체계

본 연구는 한국, 인도네시아, 국제 시민사회 조직이 참여하는 다자 협력 구조를 기반으로 수행되었다. 각 기관은 플라스틱 오염·유해물질·노동자 건강 분야에서의 전문성을 바탕으로 역할을 분담하여 연구의 질과 안전성을 확보하였다.

3.1. 노동환경건강연구소(WIOEH)

- 노동환경건강연구소는 국제 네트워크 IPEN과 오랜 기간 협력하며 유해화학물질 저감, 플라스틱 오염 규제, 취약노동자 보호 등을 목표로 다양한 연구·캠페인을 수행해 왔다. 특히

IPEN 동남아시아·동아시아 허브와는 여러 차례 공동 모니터링·정책 연구 경험을 갖고 있어, 본 사업의 총괄 수행기관으로서 적합한 전문역량을 갖추고 있다. WIOEH는 전체 연구 설계, 윤리·안전 관리, 분석 품질 관리, 정책 제언 도출 등 연구의 총괄적 운영을 담당하였다.

3.2. IPEN Southeast & East Asia Hub

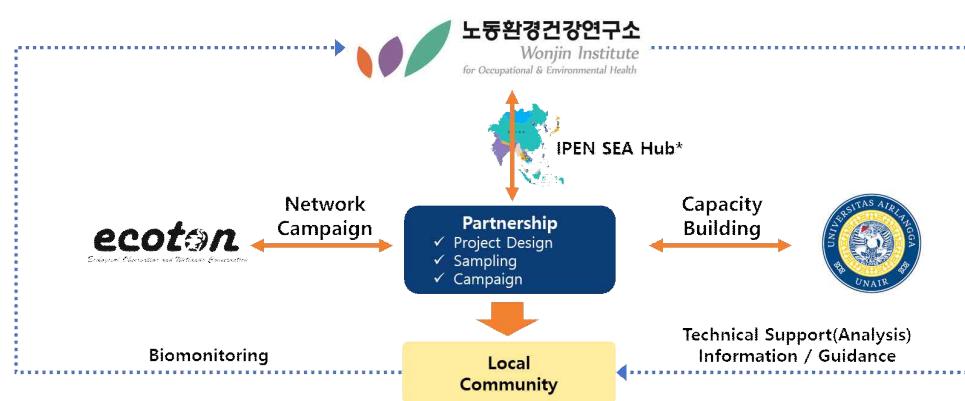
- IPEN은 국제적인 유해화학물질 저감 네트워크로, 동남아·동아시아 허브는 각국 시민사회와 연결되어 화학물질·플라스틱 관련 국제 기준과 현장 문제를 긴밀히 공유하고 있다. 본 연구에서는 사업의 국제 협력 구조 조정, 데이터 질관리 지원 및 정책적 메시지 방향성 자문을 수행하였다.

3.3. 인도네시아 ECOTON (Environment Care Organization)

- ECOTON은 인도네시아에서 플라스틱 폐기물 수입, 수질오염, 불법 소각 등 환경·건강 문제를 집중적으로 다뤄온 대표적 시민단체이다. 최근 인도네시아가 주요 플라스틱 폐기물 수입국으로 부상하면서 ECOTON은 이 이슈를 사회적·정책적 문제로 제기하며 활발한 모니터링·캠페인을 수행해 왔다.
- 본 연구에서 ECOTON은 그레식 지역 플라스틱 수거 여성 노동자 커뮤니티와의 신뢰 기반 구축, 연구 참여자 모집 및 현장 접근성 확보, Airlangga University 의대와의 협력 조정, 현장 조사(노출 환경 평가, 지역 위험요인 파악) 지원을 담당하며, 연구가 안전하고 윤리적으로 수행될 수 있도록 핵심적 역할을 하였다.

3.4. Airlangga University 의과대학

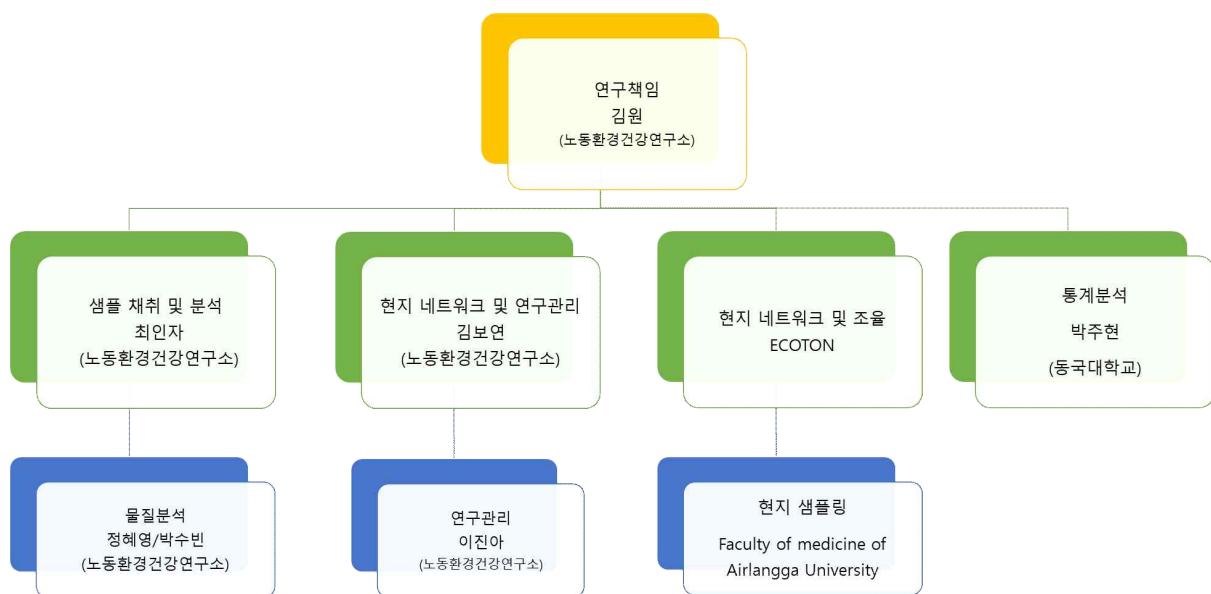
- Airlangga University는 인도네시아에서 바이오모니터링 및 환경보건 연구 역량을 보유한 주요 대학으로, 이전에도 ECOTON과 함께 혈액·소변 기반 유해물질 분석 연구를 수행한 경험이 있다.
- 본 연구에서는 참여자 사전 설명 및 동의 절차 지원, 혈액·소변 샘플링, 건강 설문조사 진행, 기초 의료 모니터링 등 현장 기반 데이터 수집을 담당하여 연구의 과학적 타당성을 확보하였다.



4. 연구팀 구성

<표 2> 연구진 기본 정보

분야별	성명	재직기간	최종학력	담당업무	주요경력	비고
사업책임자	김원	2002.03. -현재	보건학박사	연구총괄	사업장및환경의화물질노출 평가 및 관리, 위험성평가,역학조사	산업위생 관리기술사
분석부문	최인자	1999.06. -현재	이학박사	채취 및 분석	유해물질분석20년이상	-
분석부문	정혜영	2022.03. -현재	이학석사	물질분석	환경및인체유래물중유해화학 물질분석	-
분석부문	박수빈	2025.06. -현재	이학석사	물질분석	환경및인체유래물중유해화학 물질분석	-
국제협력	김보연	2021.08. -현재	국제관계학석사	연구관리, 단체간 협업총괄	국제협력연구사업 운영,대외협력,UN환경계획 국제회의참석	-
국제협력	이진아	2024.08. -현재	경영학석사	연구 및 협업보조	ESG, 지속가능경영 전략컨설팅,사회적성과 등 환경분야 연구수행	-
통계	박주현	2012.09. -현재	생물통계학 박사	통계분석	생물/의학/역학 자료통계분석	-



[그림 2] 연구진 역할 및 분담 내용

5. 연구 수행 일정

<표 3> 연구 일정

과업수행내용	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월
착수보고 및 조사준비											
현지 네트워크 조율											
현장 샘플링 계획 및 점검											
현장 샘플링											
MTA 준비 및 승인											
샘플 분석											
분석 결과 리뷰											
분석 결과 공유											
컨퍼런스(온라인)개최											
최종보고											

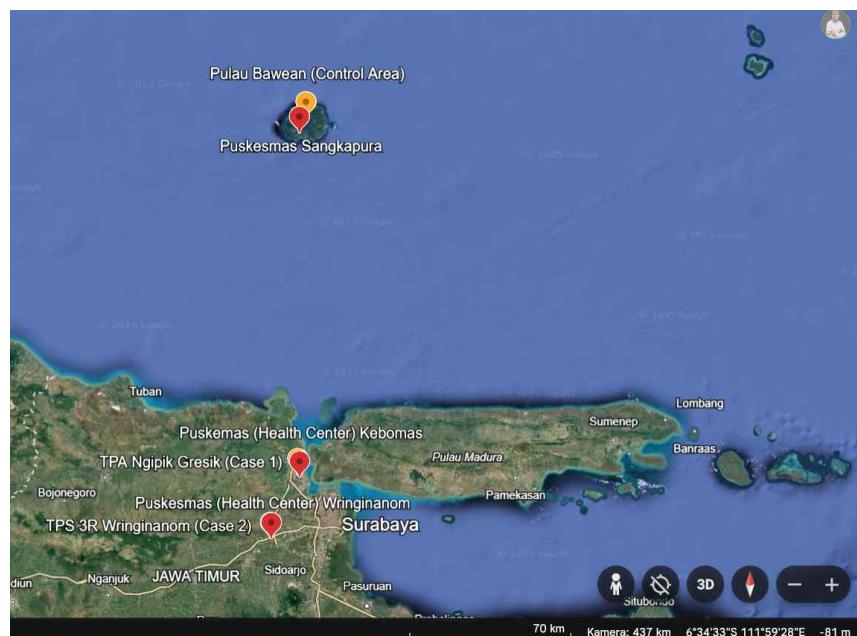
III. 연구 방법

본 연구는 인도네시아 동자바 그레식(Gresik) 지역의 폐기물 수거 여성 노동자를 대상으로 플라스틱 유래 유해화학물질의 체내 축적 수준을 파악하기 위해 (1) 생체시료 분석을 통한 바이오모니터링(Biomonitoring) 기반 정량 노출평가를 수행하고, (2) 설문조사를 병행하여 직업·생활환경 통합 노출 요인 평가를 진행하였다.

1. 조사지역 및 연구 대상

1.1. 연구 지역 선정 및 대상자 모집

- ECOTON과 현지 커뮤니티의 협력을 통해 인도네시아 그레식(Gresik) 지역의 응이픽(Ngipik)과 룽이난놈(Wringinanom) 2개의 폐기물 처리장(TPS)을 선정하고, 해당 처리장의 폐기물 수거 작업에 종사하는 여성 노동자 중 참여 희망자를 모집했다.
- 폐기물 선별장의 노동자들은 평균 적으로 5년 이상 장기근속하고 있으며, 개인 보호장비 없이 작업을 수행하고 있어 유해물질 노출 위험이 높아 다양한 질병 등 건강 위험에 취약하다.
- 비교군으로는 그레식군(Gresik Regency)에 속하지만 본토와는 다른 조건을 지닌 바위안(Bawean)섬의 여성을 대상으로 선정했다. 바위안 섬은 대규모 산업 활동이 없고, 폐기물 소각 활동도 하지 않는 지역임. 바위안섬의 대상자는 TPS에 근무하지 않으며, 거주지 내 폐기물 소각 경험이 없는 여성들로 구성했다.



[그림 3] 연구 대상 지역 및 협업 보건소 위치

- 샘플 대상 및 규모는 아래 <표 4>와 같다. 대상군은 Gresik 지역의 Wringinanom 폐기물 처리장에서 3명, Ngipik 폐기물 처리장에서 24명의 여성 폐기물 노동자로 총 27으로 모집했으며, 대조군-1 (플라스틱 폐기 및 수거와 관련이 없는 장소에 거주하는 동일 성과 연령) 5명, 대조군-2 (플라스틱 폐기 및 수거와 관련이 없는 직업과 장소에 거주하는 가족 구성원) 3명으로 총 35명으로 구성했다. 모든 연구참여자는 사업 목적과 조사 방법에 대한 설명 후 자발적 동의를 얻어 대상자 모집했다.

<표 4> 샘플 대상 및 규모

대상	Media		합계
	혈액	소변	
대상군(여성WastePickers)	27	27	54
대조군-1 (일반여성)	5	5	10
대조군-2 (활동가 가족)	3	3	6
총계	35	35	70



[그림 4] Wringinanom 폐기물 처리장 전경-1



[그림 5] Wringinanom 폐기물 처리장 전경-2



[그림 6] Wringinanom 폐기물 처리장 전경-3



【그림 7】 Ngipik 폐기물 처리장 전경 - 1



【그림 8】 Ngipik 폐기물 처리장 전경 - 2



[그림 9] Ngipik 폐기물 처리장 전경 - 3

1.2. 시료 샘플링 방법

[그림 10] 시료 샘플링 방법

1) 혈액 샘플링

- 채혈은 Faculty of medicine of Airlangga University에서 진행했다. 유해화학물질 분석 용 시료로써 전혈 3mL와 혈청분리용 전혈 5mL는 각각 EDTA-coated tube와 SST를 이용하여 채취했다.

2) 소변 샘플링

- 소변시료의 경우, '소변채취키트(용기(50 mL, PP재질), 안내문1부)'를 이용해서 작업 종료

후 혈액 채취와 동시에 소변 시료를 받았다.

3) 샘플 보관 및 이송

- Faculty of medicine of Airlangga University에서 소변 시료 샘플과 혈액채취가 완료 되면 노동환경건강연구소로 이송해서 분석 전까지 보관하고 있다.
- 노동환경건강연구소의 연구원을 인도네시아에 파견하여 샘플 채취 과정과 보관 과정을 확인하고, ECOTON에서는 분석 전까지 인도네시아에서 안전하게 보관하고 한국으로 인편으로 이송한다.
- 채취된 시료는 노동환경건강연구소의 실험실까지 이동한 후 분석 전까지 혈액은 -70°C 냉동고에 그리고 소변시료는 -20°C의 냉동고에서 보관하도록 한다. 시료 반입 이후 시료 분석을 진행한다.

4) 참가자 설문

- 바이오모니터링은 모든 오염원로부터 노출 가능한 분석대상물질의 총량이 반영된다. 따라서 직업 이외의 노출원에 의해 영향을 받을 가능성이 높으므로 이에 대한 평가가 동반되어야 하고 그것이 결과 해석에 고려되어야 한다. 이를 위해 설문조사를 병행해서 직업 이외에 영향을 미칠 수 있는 요인들을 보정해야 한다.
- 이를 위해, 설문조사는 인구학적인 특징, 식생활 및 식이습관, 생활습관(흡연력, 음주력 등), 생활환경, 건강 및 질병상태, 작업환경(작업시간, 경력, 작업환경 일반상황, 개인 보호구 착용 여부 등) 항목으로 구성했다.
- 연구 설명문과 설문은 20분 내외의 시간 동안 작성이 가능하도록 구성하였고 영어 및 현지 어로 번역했다.

2. 윤리심의위원회 심의 및 승인 (IRB)

- 연구진 전원 윤리적 연구 수행을 위한 인체유래물연구자 교육 수료했으며, 연구 대상자의 개인정보 보호 및 생체시료 채취에 대한 윤리적 기준을 충족하기 위해 녹색병원 임상시험 (심의)위원회(IRB) 심의를 신청하고, 2025년 4월 4일에 최종 승인 획득했다.

3. 분석 대상 물질

- 플라스틱에는 다양한 유해 물질이 사용된다. 이 물질들은 대부분 첨가제의 형태로 사용되는데 가소제로써 프탈레이트, 난연제로써 브롬계 혹은 유기인계 난연제, 보존제로써 파라벤류, 자외선 안정제 및 염료로써 납 및 카드뮴(cadmium; Cd) 화합물 등이 사용된다. 그리고 방수 및 방유 기능을 위해 과불화화합물(Per-and Poly-Fluoroalkyl Substances; PFAS)이 사용되고 폴리카보네이트플라스틱에는 비스페놀화합물이 주요 원료로 사용된다.

- 실제로, Joshua 등(2018)의 연구에 의하면 폐기물 야적장에서 발생하는 침출수에서 상당량의 중금속이 분석되었고 그 수준이 침출수에 대한 중금속 기준을 상회하고 있었다고 한다. 이런 상황에서 침출수 중 중금속은 지하수와 지층수를 오염시킬 수 있다는 가능성을 제시하였다. Velis 와 Cook은(2021) 노지 소각(open burning)을 통한 유해물질 노출과 그로 인한 건강위험을 추정해 비교했다. 이를 위해 주요 배출물질들, 즉, 브롬계 난연제, 프탈레이트, 다이옥신, 비스페놀A, 입자상물질들, 그리고 다핵방향족 탄화수소 등의 건강위험을 비교한 후 폐기물 노동자들이 심각한 위험에 처할 수 있음을 경고하고 있다.
- 본 연구에서는 플라스틱에 주로 사용되고 그로 인해 관련 노동자들과 시민들에게 노출 가능한 물질로써 아래와 같은 물질들을 분석 대상 물질로 선정했다. 즉, 가소제로써 가장 많이 사용되는 프탈레이트, 보존제나 플라스틱 안정제 등으로 사용되는 환경성 폐놀류, 유기인계 난연제(Organophosphate Flame Retardants; OPFR), 과불화화합물, 그리고 납과 카드뮴을 포함한 중금속류 등을 분석 대상 물질로 선정하였다. 또한 플라스틱을 포함한 폐기물 소각시 발생하는 다핵방향족탄화수소(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAH)를 분석 대상 물질에 포함시켰다.

생물학적 지표 (Biomarker)						
Urine					Blood	
프탈레이트	환경성폐놀	중금속	유기인계난연제	다핵방향족 탄화수소	중금속	과불화화합물
13 종	10 종	4 종	9 종	8 종	4 종	17 종

[그림 11] 바이오모니터링을 통한 분석대상 물질

IV. 연구 내용

1. 현장 샘플링

<표 5> 현지 출장 및 샘플링 일정

Day 1	Day 2	Day 3	Day 4	Day 5
2025. 4. 21 (월)	2025. 4. 22 (화)	2025. 4. 23 (수)	2025. 4. 24 (목)	2025. 4. 25 (금)
노동환경건강 연구소 연구진 인도네시아 수라바야 도착	Surabaya에서 Bawean 섬으로 이동	Bawean 섬에서 Surabaya 이동	Ngipik 매립지로 이동 매립지 사무소에서 대상군 23명 대상 설명회, 설문조사 및 혈액/소변 샘플 채취	최종 자료 및 샘플 확인 및 보관
Gresik에서 이해관계자 간담회 진행	Sangkapura 보건소에서 대조군-1 5명 대상 설명회, 설문조사 및 혈액/소변 샘플 채취	Wringinanom 보건소에서 대상군 3명, 대조군-2 3명 대상 설명회, 설문조사, 및 혈액/소변 샘플 채취	Industri 보건소 이동 수 시료 전처리 진행	노동환경건강 연구소 연구진 국내 복귀

1.1. 1일차 – 이해관계자 간담회 진행

○ 이해관계자 간담회 및 설명회 진행

- 노동환경건강연구소 소개 및 인도네시아 여성 폐기물 노동자 프로젝트 소개
- ECOTON의 자원순환, 제로웨이스트 활동 및 대상 지역 현황 소개
- 한국의 재활용 수거 체계의 과거와 현재 소개
- 향후 협력 방안 및 질의 응답
- 시료 채취 방법 및 유의 사항 설명

○ 참석자

- 자원순환국 사무관: Perkenalan Singkat Tiap
- 협력 의과 대학: Universitas Airlangga & IKA
- 보건소의 시료 채취 인원: Puskesmas Wringinanom, Puskesmas Industri, Kepala Dinas Lingkungan
- 지역 정부 공무원: Hidup Kabupaten Gresik (Kepala Dinas Lingkungan), Dinas Kesehatan Kabupaten Gresik (UPT TPA Ngipik), Ikatan Dokter Indonesia Cabang Gresik (BAPPEDA Kabupaten)



[그림 12] 이해관계자 간담회 및 설명회

1.2. 2일차 – 대조군-1 생체시료 채취

- 대조군 시료 채취를 위한 Bawean 섬 이동
- Puskesmas Sangkapura (Sangkapura 보건소)
 - : 참여자 및 의료 인력, 보건소장 프로젝트 설명회 진행
 - : 대조군 시료 채취, 전처리, 보관
 - : 보건소 입원 시설 개소 기념회 참가



[그림 13] Sangkapura 보건소



[그림 14] Sangkapura 보건소 시료 분주 작업

1.3. 3일차 – Wringinanom 대상군 생체시료 채취

- SD Isalmic Terpadu Al-Huda 초등학교 방문
: 교내 쓰레기 줄이기 활동 및 시설 참관



[그림 15] SD Isalmic Terpadu Al-Huda 초등학교

- 수라바야 섬 복귀, Wringinanom 보건소
: Pengolahan 자원 회수 시설 종사자 시료 채취, 혈액 전처리
- Pengolahan Recovery Center (자원 회수 시설) 방문
: 소규모 재활용 분류, 매립, 소각 및 유기물 처리 시설 실태 확인



[그림 16] Pengolahan Recovery Center (자원 회수 시설)

- ECOTON 방문

- : 시료 보관
- : 시료 채취 상황 중간 점검 및 질의 응답
- : 시료 반입 문제 해결을 위한 보관, 이송 방법 시뮬레이션

1.4. 4일차 – Ngipik 대상군 생체시료 채취

- Ngipik Landfill (매립지 내 사무소)에서 폐기물 노동자 시료 대상 설명회 및 시료 채취



[그림 17] Ngipik Landfill 배치도

- Puskesmas Industri(Industri 보건소)로 시료 이동, 혈액 원심 분리 등 전처리 진행
- Ngipik Landfill 시설 견학



〔그림 18〕 Industri 보건소 시료 분주 작업



〔그림 19〕 Ngipik Landfill 시설 견학

2. 시료 반출 및 이송

2.1. 현지 시료 반출 관련 이슈 사항

- 현지 파트너인 ECOTON과 Airlangga University는 과거 한국 연구팀과의 바이오모니터링 경험을 바탕으로, 인도네시아 세관 규정상 전염성 질병이 없는 경우 생체시료의 국외 반출이 가능함을 사전에 확인하였다. 그러나 수라바야 공항 세관에서 연구자가 휴대한 시료 채취용 플라스틱 용기와 보조 도구가 반입 불허 및 압류되는 예기치 않은 문제가 발생하였다.
- 해당 물품은 현지에서 신속히 대체 조달되어 샘플링에는 지장이 없었으나, 정치적 요인으로

통관 규제가 강화된 상황에서 시료 반출이 지연될 위험이 있었다. 이에 연구팀은 시료를 현지에 보관한 뒤, MTA(Material Transfer Agreement) 절차를 공식적으로 진행하여 적법한 반출하도록 결정하였다.

- 이후, ECOTON, Airlangga University와 긴밀하게 협력하여 MTA 서류 준비와 신청을 하였으며, 노동환경건강연구소-Airlangga University 간 연구협력, 기술이전을 포함하는 MTA를 인도네시아 보건부의 승인을 7월초 취득하였다.
- ECOTON 연구진과 Airlangga University의 연구책임자인 Dr. Lestari는 보존된 혈액·소변 시료를 직접 운반해 2025년 7월 15일 노동환경건강연구소(WIOEH)로 안전하게 전달하였다. 시료는 국제 기준에 따라 문제 없이 수령되었고, 즉시 분석을 개시하여 모든 분석 항목을 사업 기간 내에 완료하였다.
- 이번 MTA 구축을 통해 Airlangga University-ECOTON-WIOEH 간 연구협력 체계가 마련되었으며, 향후 인도네시아-한국 간 공동 바이오모니터링 연구협력 기반이 강화되었다.

3. 시료 분석 및 결과

3.1. 중금속

- 혈액과 소변 중 납, 카드뮴, 니켈 및 크롬 분석을 위한 분석용 시료는 희석액(Modifier)과 초순수(Deionized water)로 희석하였고, 내부표준물질(Internal Standard) 첨가하여 제조하였다. 소변용 희석액은 0.1% HNO₃ + 1% Methanol + 0.002% Triton x-100이며, 혈액용 희석액은 0.1% HNO₃을 사용하였다. 내부표준물질로써 로듐(Rh)을 첨가하였다. 금속 분석은 ICP-MS(NexION 2000, PerkinElmer; [그림 19])를 이용하여 분석했다.



[그림 20] 유도결합플라즈마 질량분석기

- 정확성·정밀도 확인을 위해 표준물질, ClinChek® Level (8840)(Whole Blood Control, lyophil. for Trace Elements)을 시료와 함께 분석하였다. 혈액 중 카드뮴, 납, 크롬 및 니켈 정확성은 104.0~121.7% 범위였으며, 정밀도는 1.7~5.6% 범위였다. 소변 중 카드

뮴, 납, 크롬 및 니켈의 정확성은 88.1~104.0%, 정밀도는 2.1~8.8% 범위로 나타났다 <표 6>. 혈액시료 중 검출한계는 카드뮴 0.028, 납 0.014, 크롬 0.0119 그리고 니켈 0.098 $\mu\text{g}/\text{L}$ 였으며, 소변시료 중 검출한계는 카드뮴 0.005, 납 0.083, 크롬 0.019 그리고 니켈 0.068 $\mu\text{g}/\text{L}$ 였다.

<표 6> 혈액 및 소변 중 CRM 분석 결과 (단위: $\mu\text{g}/\text{L}$)

혈액	Cd	Pb	Cr	Ni
	0.292	6.80	0.480	0.518
1	0.350	6.83	0.622	0.624
2	0.363	7.67	0.586	0.561
3	0.351	6.91	0.566	0.603
4	0.356	6.89	0.561	0.638
평균	0.355	7.07	0.584	0.607
정확성(%)	121.6	104.0	121.7	117.1
정밀도(%)	1.7	5.6	4.7	5.5
소변	0.438	1.32	0.830	0.672
1	0.413	1.28	0.802	0.650
2	0.394	1.22	0.816	0.789
3	0.372	1.14	0.831	0.682
4	0.365	1.12	0.842	0.673
평균	0.386	1.19	0.823	0.699
정확성(%)	88.1	90.3	99.1	104.0
정밀도(%)	5.6	6.2	2.1	8.8

3.2. 소변 내 프탈레이트 대사체 분석

- 소변 내에서 8종의 프탈레이트에 대한 13종의 대사체를 분석하였다. 소변 내 프탈레이트 대사체 분석은 Giovanna Tranfo et al (2012)와 CDC의 Laboratory Procedure Manual(2013)을 참조하였다. 냉동보관 하였던 소변 시료는 상온에서 녹인 후에 10,000 rpm에서 10분간 원심분리한 후 0.1 mL 를 분석용 시료로 취하였다. 다음으로 내부표준시약, β -글루쿠론산분해효소(β -glucuronidase in 1M Ammonium Acetate buffer solution)를 순서대로 주입하였다. 용액을 혼합시킨 다음 37°C에서 2시간 동안 가수분해시켰다. 가수분해가 끝난 후 0.1 M 포름산 수용액을 주입하고, 증류수로 최종 시료양을 1 mL 로 맞추어 분석용 시료로 사용하였다. 시료는 On-line SPE (Solid Phase Extraction) system이 장착된 LC-MS/MS (LC-30AD /LC-MS8050, Shimadzu, Japan; [그림 20])로 분석하였으며 분석조건은 <표 7>과 같다.



[그림 21] LC-MS/MS (LC-30AD /LC-MS8050, Shimadzu, Japan)

<표 7> 소변 중 프탈레이트 대사체 분석을 위한 LC-MS/MS조건

Parameters	Condition
Interface	Electro spray negative ionization (ESI)
Column	Delay column : Shim-packGIST(50×2.1mm, 2μm) Analysis column : ACE5-C18-PFP(150×2.1mm, 5μm)
Eluent	Pump A: 0.1% Acetic acid in water Pump B: Methanol 100% Pump C: 0.1% Acetic acid in water
Flow	Pump A+B: 0.2 mL/min, Pump C: 0.4 mL/min
Injection volume	300 μL

- 전처리 과정 중 분석대상물질의 손실을 보정하기 위해 내부표준물질법을 사용하였다. 검정곡선은 시료의 농도 수준을 고려하여 0.471 ~ 100.99 μg/L 수준으로 표준시약을 제조하였다. 검정곡선의 결정계수(R2)는 모두 0.99 이상이었다. 시료 전처리 및 분석 과정에서의 오염 여부를 확인하기 위해 각 배치별로 바탕시료(Blank)를 시료와 함께 분석하였다. 분석의 정확성 및 정밀성을 확인하기 위해 표준시약을 약 12 μg/L 수준으로 spike한 합성소변을 소변 시료와 동일하게 전처리한 후 분석하였다. 검출한계는 가장 낮은 농도의 표준시약을 7회 반복 분석한 값의 표준편차에 3.14를 곱한 값으로 계산하였다. 정확성, 정밀성 및 검출한계는 <표 8>과 같다.

<표 8> 프탈레이트 대사체 정확도, 정밀도 및 검출한계

물질명	주입량 ($\mu\text{g}/\text{L}$)	검출량 (n=5)	정확도 (%)	변동계수 (%)	검출한계 ($\mu\text{g}/\text{L}$)
MMP	12.125	12.589	103.8	2.1	0.361
MEP	12.650	11.009	87.0	6.7	0.287
MiBP	12.712	12.169	95.7	9.0	0.614
MnBP	12.151	11.393	93.8	8.5	0.840
MBzP	12.438	11.624	93.5	3.9	0.503
MEHP	11.785	10.330	87.6	3.5	0.482
MEHHP	12.388	12.615	101.8	2.5	0.258
MEHOP	13.623	12.720	93.4	5.7	0.441
MECPP	13.623	13.459	98.8	6.1	0.448
MCPP	13.623	11.935	87.6	8.9	0.964
MINP	12.388	13.355	107.8	2.5	0.289
MCiOP	13.623	11.856	87.0	2.7	0.524
MHiNP	13.623	13.346	98.0	4.8	0.335

3.3. 소변 중 환경성 페놀 분석

- 소변 중 비스페놀 화합물 3종 (BPA, BPS, BPF), 파라벤류 4종 (Me-P, Et-P, Pr-P, Bt-P), 트리클로란, 벤조페논-1 및 벤조페논-3 등 10종을 분석하였다. 소변 중 환경성 페놀류 분석은 CDC의 Laboratory Procedure Manual(2009)을 참조하였다. 냉동보관 하였던 소변 시료는 상온에서 녹인 후 10,000 rpm에서 10분간 원심분리 후 0.1 mL를 분석용 시료로 취하였다. 그 다음 내부표준시약, β -글루쿠론산분해효소(β -glucuronidase in 1M Ammonium Acetate buffer solution)를 순서대로 주입한 다음, 37°C에서 2시간 동안 가수분해시켰다. 가수분해가 끝난 후 0.1 M 포름산 수용액을 주입하고, 증류수를 이용하여 최종 시료양을 1 mL로 맞추어 분석용 시료로 사용하였다. 시료는 On-line SPE system이 장착된 LC-MS/MS (LC-30AD /LC-MS8050, Shimadzu, Japan; [그림 20])로 분석하였으며, 분석조건은 <표 9>와 같다.

<표 9> 소변 중 환경성 페놀 분석을 위한 LC-MS/MS 조건

Parameters	Condition
Interface	Electro spray negative ionization (ESI)
Column	Delay column : Shim-packGIST(50×2.1mm, 2 μm) Analysis column : ACE5-C18-PFP(150×2.1mm, 5 μm)
Eluent	Pump A: Water 100% Pump B: Methanol 100% Pump C: 0.1% Formic acid in water
Flow	Pump A+B: 0.2 mL//min, PumpC: 0.4 mL//min
Injection volume	300 μl

- 시료의 전처리 과정에서 분석대상물질의 손실을 보정하기 위해 내부표준물질법을 사용하였다. 검정곡선은 시료의 농도 수준을 고려하여 0.043~4.669 $\mu\text{g}/\text{L}$ 수준으로 표준시약을 제조하였다. 작성한 검정곡선의 결정계수(R^2)는 모두 0.995 이상이었다. 시료 전처리 및 분석 과정에서의 오염 여부를 확인하기 위해 각 배치별 바탕시료를 시료와 함께 분석하였다. 분석의 정확성 및 정밀성을 확인하기 위해 G-EQUAS(German External Quality Assessment Scheme) 74회차 정도관리 시료와 SRM 3673 (Organic contaminants in non-smoker's urine, NIST, USA) 시료를 소변 시료와 동일하게 전처리한 후 분석하였다. 각 물질별 정확성 및 정밀도 그리고 검출한계는 <표 10>과 같다. 검출한계는 가장 낮은 농도의 표준시약을 7회 반복 분석한 값의 표준편차에 3.14를 곱한 값으로 계산하였다.

<표 10> G-EQUAS 74회 및 SRM 3673 중 환경성 페놀 분석결과 (단위: $\mu\text{g}/\text{L}$)

물질명	G-EQUAS 74회				SRM 3673				검출한계
	기준값	검출량	정확도 (%)	변동계수 (%)	기준값	검출량	정확도 (%)	변동계수 (%)	
BPA	1.00	1.10	109.9	12.7	5.97	5.83	97.6	12.2	0.14
BPF	1.54	1.45	94.2	21.4	3.39	3.26	96.2	12.9	0.17
BPS	0.85	0.91	106.7	5.6	1.47	1.54	105.0	11.2	0.42
TCS	-	-	-	-	-	-	-	-	1.56
BP-1	1.18	0.92	78.3	17.5	9.82	8.86	90.2	5.4	0.35
BP-3	3.36	3.16	94.0	12.6	17.68	14.05	79.5	18.8	0.23
Me-P	81.011	73.074	90.2	6.2	-	-	-	-	0.53
Et-P	10.496	7.726	73.6	17.0	-	-	-	-	0.41
Pp-P	22.010	19.898	90.4	12.3	-	-	-	-	0.54
Bt-P	1.131	0.943	83.4	12.0	-	-	-	-	0.23

(*: 자료없음)

3.4. 소변 중 유기인계 난연제 분석

- 소변 중 유기인계 난연제 대사체 분석은 Wang et al (2019)을 참조하였다. -20°C에서 보관한 소변은 상온에서 해동시킨 후 4,500 rpm에서 10분간 원심분리시킨 후 1 mL 을 분석 용 시료로 취하였다. 시료에 내부표준시약, β -글루쿠론산분해효소(β -glucuronidase in 1M Ammonium Acetate buffer solution)를 순서대로 주입하였다. 용액을 혼합시킨 다음 37°C에서 overnight 가수분해시켰다. 가수분해가 끝난 후 0.1 M 포름산 수용액을 주입하고, SPE (Solid Phase Extraction) 전처리 과정을 거친 후, 질소 가스로 농축하였다. 농축한 시료는 5% 메탄올 수용액, 200 μL 로 재용해한 뒤 분석용 시료로 사용하였다. 시료는 LC-MS/MS (Liquid chromatography-Mass spectrometer, LCMS-8060, SHIMADZU,

Japan; [그림 21])로 분석하였으며 분석조건은 <표 11>과 같다.



[그림 22] LC-MS/MS (LC-MS 8060, Shimadzu, Japan)

<표 11> 소변 중 유기인계 난연제 대사체 분석을 위한 LC-MS/MS 조건

Parameters	Condition	
	BCEP,BCPP	BDCPP, DPhP, DBuP, DBzP, DoCP, DpCP, TBBA
Interface	Electrospray negative ionization(ESI)	
Column	Shim-pack GIST (50×2.1mm, 2μm)	ACE5-C18-PFP (150×2.1mm, 5μm)
Eluent	Pump A: 10mM ammonium acetate in water Pump B: Methanol 100%	
Flow	Pump A+B : 0.2 ml/min	Pump A+B: 0.35 ml/min
Injection volume	10 μl	5 μl

- 시료 전처리 과정에서 분석대상물질의 손실을 보정하기 위해 내부표준물질법을 사용하였다. 검정곡선은 시료의 농도 수준을 고려하여 0.107~9.901 μg/L 수준으로 표준시약을 제조하였다. 작성한 검정곡선의 결정계수(R²)는 TBBA(0.99이상)를 제외하고 모두 0.995 이상이었다. 시료 전처리 및 분석 과정에서의 오염 여부를 확인하기 위해 각 배치별 바탕시료를 시료와 함께 분석하였다. 분석의 정확성 및 정밀성을 확인하기 위해 합성소변에 표준시약을 각각 0.212, 2.329 μg/L 수준으로 주입시킨 다음 시료와 동일하게 전처리한 후 분석하였다. 검출한계는 가장 낮은 농도의 표준시약을 7회 반복 분석한 값의 표준편차에 3.14를 곱한 값으로 계산하였다. 유기인계 난연제 대사체의 정확성, 정밀도 및 검출한계는 <표 12>와 같다.

<표 12> 유기인계 난연제 정확도, 정밀도 및 검출한계 (단위: $\mu\text{g}/\text{L}$)

물질명	주입량	검출량 (n=3)	정확도 (%)	변동 계수 (%)	주입량	검출량 (n=3)	정확도 (%)	변동 계수 (%)	검출 한계
BCEP	0.212	0.170	80.3	0.4	2.329	1.753	75.3	5.2	0.012
BCPP	0.212	0.195	92.2	10.9	2.329	1.953	83.8	11.1	0.029
BDCPP	0.212	0.154	72.7	34.5	2.329	2.356	101.2	6.5	0.048
DPhP	0.212	0.174	82.0	6.4	2.329	2.177	93.5	2.4	0.075
DuBP	0.212	0.188	89.0	8.7	2.329	1.761	75.6	4.8	0.054
DBzP	0.212	0.226	106.7	12.2	2.329	2.070	88.9	4.8	0.040
DoCP	0.212	0.203	96.1	2.2	2.329	2.004	86.0	1.7	0.024
DpCP	0.212	0.221	104.2	5.6	2.329	2.137	91.7	5.1	0.024
TBBA	0.212	0.266	125.6	6.1	2.329	1.843	79.1	9.8	0.085

3.5. 소변 중 다환방향족탄화수소 대사체 분석

- 소변 중 다환방향족탄화수소 대사체 분석은 Xu Rong-Fa et al (2023)을 참조하였다. -2 0°C에서 보관한 소변은 상온에서 해동시킨 후에 4,000 rpm에서 10분간 원심분리 후 1 mL 를 분석용 시료로 취하였다. 시료에 내부표준시약, β -글루쿠론산분해효소(β -glucuronidase in 1M Ammonium acetate buffer solution, pH 5)를 순서대로 주입하여 용액을 혼합시킨 다음 37°C에서 overnight 가수분해시켰다. 가수분해가 끝나고 SPE 전처리 과정을 거친 후, 질소 가스로 농축하였다. 농축한 시료는 메탄올 100 μl 로 재용해하여 분석용 시료로 사용하였다. 시료는 LC-MS/MS (Liquid chromatography-Mass spectrometer, LCMS-8050, SHIMADZU, Japan; [그림 20])로 분석하였으며, 기기 조건은 <표 13>과 같다.

<표 13> 소변 중 다환방향족탄화수소 대사체 분석을 위한 LC-MS/MS 조건

Parameters	Condition
Interface	Electro spray negative ionization (ESI)
Column	ACE5-C18-PFP(150×2.1mm, 5 μm)
Eluent	Pump A: Water 100% Pump B: Methanol 100%
Flow	Pump A+B: 0.3 mL/min
Injection volume	10 μl

- 시료 전처리 과정에서 분석대상물질의 손실을 보정하기 위해 내부표준물질법을 사용하였다. 검정곡선은 시료의 농도 수준을 고려하여 0.026~19.523 $\mu\text{g}/\text{L}$ 수준으로 제조하였다. 작성한 검정곡선의 결정계수(R^2)는 0.995 이상이었다. 시료 전처리 및 분석 과정에서의 오염 여부를 확인하기 위해 각 배치별 바탕시료를 시료와 함께 분석하였다. 분석의 정확성 및

정밀성을 확인은 SRM 3673 (Organic contaminants in non-smoker's urine, NIST, USA)과 합성소변에 표준시약을 각각 0.148, 1.775 $\mu\text{g}/\text{L}$ 수준으로 주입시켜서 시료와 동일하게 전처리한 후 분석하였다. 검출한계는 가장 낮은 농도의 표준시약을 7회 반복 분석한 값의 표준편차에 3.14를 곱한 값으로 계산하였다. 다환방향족탄화수소 대사체의 정확성, 정밀성 및 검출한계는 <표 14>와 같다.

<표 14> 다환방향족탄화수소 대사체 정확도, 정밀도 및 검출한계 (단위: $\mu\text{g}/\text{L}$)

물질명	SRM 3673				spiked sample				검출 한계
	기준값	검출량 (n=3)	정확도 (%)	변동 계수 (%)	주입량	검출량 (n=2)	정확도 (%)	변동 계수 (%)	
1-OH-NAP	211	204	96.5	34.5	0.523	0.341	65.3	16.5	0.044
2-OH-NAP	1.345	0.840	62.4	9.3	0.524	0.440	84.0	12.5	0.036
2-OH-FLU	-	-	-	-	0.518	0.462	89.2	6.8	0.013
3-OH-FLU	0.039	0.028	71.5	28.2	0.518	0.389	75.1	13.9	0.014
1-OH-PHE	0.049	0.042	85.5	12.4	0.508	0.378	74.3	10.4	0.007
2-OH-PHE	0.025	0.027	109.7	8.4	0.534	0.592	111.0	6.9	0.008
1-OH-PYR	0.030	0.025	80.5	7.8	0.517	0.465	89.9	6.6	0.011
3-OH-BaP	-	-	-	-	0.461	0.057	12.3	4.0	0.009

3.6. 혈액 중 과불화화합물 분석

- PFOA를 포함한 PFCAs (Perfluorocarboxylic acids) 계열 13종과 PFOS를 포함한 PFASs(Perfluoroalkane sulfonates) 계열 4종을 포함하여 총 17종의 과불화화합물을 분석하였다. 혈청 중 과불화화합물 분석은 Kuklenyik et al (2004)을 참조하였다. -70°C에서 보관한 혈청은 상온에서 해동시킨 후에 사용하였다. 시료에 내부표준물질과 0.1 M 포름산을 넣고 혼합시킨 다음 20분간 초음파 처리하여 혼합하였다. 다음으로 SPE 정제과정을 거친 후, LC-MS/MS (Liquid chromatography -Mass spectrometer, LCMS-8060, SHIMADZU, Japan; [그림 21])로 분석하였으며 분석조건은 <표 15>와 같다.

<표 15> 혈청 중 과불화화합물 분석을 위한 LC-MS/MS조건

Parameters	Condition
Interface	Electro spray negative ionization (ESI)
Column	ACE5-C18-PFP (150×2.1mm, 5 μm)
Eluent	Pump A: 20 mM ammoniumacetateinwater Pump B: Acetonitrile100%
Flow	Pump A+B: 0.4 mL/min
Injection volume	5 μl

- 시료 전처리 과정에서 분석대상물질의 손실을 보정하기 위해 내부표준물질법을 사용하였다. 검정곡선은 시료의 농도 수준을 고려하여 0.043~4.669 $\mu\text{g}/\text{L}$ 수준으로 표준시약을 제조하였다. 작성한 검정곡선의 결정계수(R^2)는 PFODA(0.99이상)를 제외한 모든 물질은 0.995 이상이었다. 시료 전처리 및 분석 과정에서의 오염 여부를 확인하기 위해 각 배치별 바탕 시료를 시료와 함께 분석하였다. 분석의 정확성 및 정밀성을 확인하기 위해 표준용액 제조 용 혈청에 표준시약을 0.408 $\mu\text{g}/\text{L}$ 수준으로 주입한 다음 시료와 동일하게 전처리한 후 분석하였다. 검출한계는 가장 낮은 농도의 표준시약을 7회 반복 분석한 값의 표준편차에 3.14를 곱한 값으로 계산하였다. 과불화화합물의 정확성, 정밀성 및 검출한계는 <표 16>과 같다.

<표 16> PFASs 정확도, 정밀도 및 검출한계 (단위: $\mu\text{g}/\text{L}$)

물질명	주입량	검출량	정확도 (%)	변동계수 (%)	검출한계
PFPeA	0.408	0.420	103.0	1.0	0.008
PFHxA	0.408	0.430	105.5	0.8	0.013
PFHpA	0.408	0.405	99.4	11.7	0.012
PFOA	0.408	0.413	101.3	2.6	0.007
PFNA	0.408	0.430	105.4	2.5	0.011
PFDA	0.408	0.419	102.9	2.7	0.008
PFUdA	0.408	0.379	93.1	5.4	0.006
PFDoA	0.408	0.403	98.9	1.3	0.006
PFTrDA	0.408	0.372	91.3	1.1	0.009
PFTeDA	0.408	0.385	94.4	0.5	0.012
PFHxDA	0.408	0.406	99.6	0.5	0.023
PFODA	0.408	0.469	115.0	3.2	0.013
PFBS	0.408	0.323	79.2	9.4	0.017
PFHxS	0.408	0.429	105.1	3.5	0.018
PFHpS	0.408	0.516	126.7	3.8	0.028
PFOS	0.408	0.586	143.8	3.4	0.022
PFDS	0.408	0.398	97.7	9.0	0.011

3.7. 통계분석

- 우선, 관심 대상 물질 또는 설문 문항에 대해서는 탐색적 자료 분석으로 기초 통계를 생산하였다. 분석대상물질은 연속형 자료이므로 자료의 수, 검출한계(limit of detection; LOD), 기하평균 (geometricmean; GM), 기하표준편차(geometric standard deviation; GSD), 중위값, 최소값 및 최대값을 요약 통계량으로 제시하였다. 설문문항의 연속형 변수

(예, 나이, 경력 등)는 평균을 이용한 centering을 이용해 분석을 진행하였다. 자료 분석시 분석대상물질의 경우, 검출율(detection rate)이 50%보다 적은 경우는 안정적인 통계 분석을 실시할 수 있는 데이터 분포로 여길 수 없다. 따라서 검출률이 50% 이상인 물질들만을 대상으로 통계 분석을 실시하였다. 각 물질에 영향을 미칠 수 있는 독립변수들(예, 생활 습관, 식습관 등)을 보정하면서 폐기물 수거 노동 여부 및 경력과 같은 변수들이 각 측정 물질과 연관성이 있는지를 fixed effect로 추정하였다.

V. 연구 결과

1. 연구참여자의 인구학적 특징

- 혈액 및 소변 시료를 채취한 총 35명 중 가족 참여자 3명을 제외한 여성 폐기물 노동자(대상군) 27명, 대조군 5명 등 총 32명을 최종연구대상으로 하였다. 대상군과 대조군의 인구학적인 특징은 <표 17>과 같다. 대상군의 평균나이는 48.4세, 대조군의 평균나이는 34.8세였다. 대상군 중 1명이 현재 흡연 중이었고, 나머지 26명 그리고 대조군 5명은 현재 비흡연자였으며, 음주는 대상군과 대조군 모두 대부분 마시지 않는다고 응답했다. 대상군 중 14명은 집과 작업장 사이 거리가 0.5 km 이내에 거주하였고, 0.5~1 km 는 2명 그리고 나머지 11명은 1.0 km 이상 떨어져 서 거주하였다. 대조군은 폐기물 작업장에서 수십 km 이상 떨어져 있는 섬 지역에 거주하였다.

<표 17> 대상군 및 대조군의 인구학적 특징

특징		대상군 (N=27)	대조군 (N=5)
체질량지수 (Body Mass Index, BMI) kg/m ²	저체중	2	0
	정상	9	4
	과체중	8	1
	비만	2	0
	NA*	6	0
현재 흡연여부	예	1	0
	아니오	26	5
음주여부	마시지 않음	24	4
	거의 매일 마심	2	1
	NA	1	0
집과 작업장 사이의 거리	0.5 km 이내	14	0
	0.5 ~ 1.0 km	2	0
	1.0 km 이상	11	0
	NA	0	5

(NA: Not Available, 자료없음)

- 대상군의 직업적 특성은 <표 18>과 같다. 여성 폐기물 노동자의 경력은 11.5(표준편차 10.3)년 이었으며, 하루 평균 작업시간은 7.72 시간/일, 주당 평균 작업 일수는 5.63일/주 였고, 작업장 내에서의 평균 소각횟수는 0.12회/일로 비교적 낮았다. 작업 내용(복수응답)은 폐기물 분류(n=13)가 가장 많았고, 폐기물 수거와 폐기물 분류를 모두 수행하는 경우(n=7)가 두 번째로 많았다. 취급하는 폐기물 종류는 플라스틱, 종이류, 유리류, 섬유류 순이었다. 작업시 개인보호장비는 장갑, 마스크 및 장화를 주로 착용하는 것으로 나타났다.

<표 18> 대상군의 직업적 특성

특징		n		
경력(N=27), yrs		11.5±10.3		
일 작업시간(N=25), hrs		7.72±1.17		
주 작업일수(N=24), day		5.63±0.77		
하루소각 빈도 (N=25)		0.12±0.33		
주요 작업	폐기물 분류	13		
	폐기물 수집	3		
	폐기물 분류 및 수집	7		
	기타	1		
폐기물 재질	플라스틱류	25		
	종이류	18		
	유리류	16		
	섬유류	1		
	예	아니오	NA	
개인보호장비 착용	마스크	18	8	1
	장갑	22	4	1
	장화	16	10	1
	작업복	2	24	1
	헬맷	2	23	2

(NA: Not Available, 자료없음)

2. 바이오모니터링 결과

2.1. 분석대상물질의 농도 분포

- 중금속, 프탈레이트 대사체, 환경성 폐놀, 유기인계 난연제 대사체, 다환방향족탄화수소 대사체 그리고 과불화화합물 등 6개 화학물질군 65종의 검출률, 산술평균, 표준편차, 기하평균, 기하표준편차, 중위값, 최소값 및 최대값 농도 분포는 <표 19>에 정리하였다.
- 총 65종 중 57종(87.8%)은 1명 이상의 소변 또는 혈액에서 검출되었고, 여성 폐기물 노동자의 체내에서는 평균 40종의 화학물질이 검출되었다.
- 6개 화학물질군에서 다양하게 검출되었는데, 특히 혈액과 소변에서 각각 납(Pb), 카드뮴(Cd), 크롬(Cr) 및 니켈(Ni), 프탈레이트 대사체 중 MEP, MnBP, MEHP, MEHHP, MEOHP 및 MECPP 등 6종, 환경성 폐놀 중 Me-P, 다환방향족탄화수소 대사체 중 2-OH-NAP, 1-HO-PHE, 2-OH-PHE 및 1-HO-PYR 등 4종 그리고 과불화화합물 중 PFOA, PFNA, PFHxS 및 PFOS 등 총 23종은 대상군과 대조군 모두에서 100% 검출되었다.

<표 19> 대상군(N=27)과 대조군(N=5)에서 분석대상물질의 농도 분포

시료	모화합물	분석대상물질	그룹	검출한 계	검출빈 도 (%)	산술 평균	표준편 차	기하 평균	기하 표준 편차	중위 값	최소 값	최대값	p-val
중금속(Heavy metals)													
혈액	Cadmium, Cd	Cadmium, Cd	대조군	0.028	100.0	1.34	0.55	1.26	1.46	1.03	0.90	2.20	0.125
			대상군		100.0	1.03	0.39	0.98	1.38	0.90	0.62	2.46	
		Lead, Pb	대조군	0.014	100.0	34.04	27.94	26.95	2.09	22.72	13.94	80.88	0.870
			대상군		100.0	29.54	10.07	27.89	1.43	27.91	9.93	56.25	
		Chromium, Cr	대조군	0.119	100.0	1.03	0.43	0.97	1.47	0.95	0.64	1.75	0.002
			대상군		100.0	0.59	0.28	0.55	1.41	0.52	0.32	1.77	
	Nickel, Ni	대조군	0.098	100.0	3.70	1.35	3.54	1.38	3.14	2.68	6.04	0.005	
		대상군			100.0	2.27	0.85	2.13	1.42	2.00	1.36	4.63	
소변	Cadmium, Cd	Cadmium, Cd	대조군		100.0	0.40	0.36	0.30	2.31	0.29	0.13	1.00	0.488
			대상군		100.0	0.28	0.14	0.25	1.63	0.24	0.08	0.75	
		Lead, Pb	대조군		100.0	0.98	0.72	0.83	1.79	0.74	0.54	2.25	0.559
			대상군		100.0	0.95	1.00	0.64	2.68	0.64	0.03	4.31	
		Chromium, Cr	대조군		100.0	0.29	0.14	0.27	1.49	0.22	0.20	0.52	0.759
			대상군		100.0	0.35	0.30	0.29	1.76	0.28	0.13	1.68	
	Nickel, Ni	대조군		100.0	2.34	0.76	2.23	1.41	2.22	1.39	3.14	0.547	
		대상군			100.0	3.29	2.60	2.67	1.87	2.72	0.87	13.03	
프탈레이트(Phthalates)													
소변	Di-methyl phthalate	Mono-methyl phthalate (MMP)	대조군	0.36	60.0	4.90	5.89	1.58	6.44	4.56	0.13	14.60	*
			대상군		40.7	12.59	19.37	1.45	12.02	0.28	0.08	74.02	
	Di-ethyl phthalate	Mono-ethyl phthalate (MEP)	대조군	0.29	100.0	1049	687	793.0	2.6	1169	181.8	1794	0.445
			대상군		100.0	4825	13858	392.3	7.2	269	18.4	58365	
	Di-isobutyl phthalate	Mono-isobutyl phthalate (MiBP)	대조군	0.61	100.0	4.53	1.76	4.24	1.51	4.54	2.37	6.95	0.743
			대상군		96.3	7.75	8.89	4.96	2.81	5.44	0.20	45.64	

시료	모화합물	분석대상물질	그룹	검출한 계	검출빈도 (%)	산술평균	표준편차	기하평균	기하표준편차	증위값	최소값	최대값	p-val
Di-n-butyl phthalate		Mono-n-butyl phthalate (MnBP)	대조군	0.84	100.0	42.9	30.9	32.8	2.4	36.4	9.81	82.71	0.140
			대상군		100.0	122.9	179.2	68.9	2.8	63.1	11.01	884.11	
Benzyl butyl phthalate	butyl	MonoBenzyl butyl phthalate (MBzP)	대조군	0.50	0.0	-	-	-	-	-	-	-	*
			대상군		14.8	0.49	0.62	0.34	2.12	0.32	0.11	2.99	
Di(2-ethylhexyl)phthalate		Mono (2 - ethylhexyl) phthalate (MEHP)	대조군	0.48	100.0	4.45	3.04	3.64	2.04	3.18	1.80	8.44	0.062
			대상군		100.0	12.82	14.93	8.36	2.46	8.11	1.58	70.03	
		Mono(2-ethyl-5-hydroxyhexyl) phthalate (MEHHP)	대조군	0.26	100.0	24.12	4.69	23.76	1.21	23.28	18.73	30.51	0.001
			대상군		100.0	96.90	92.72	75.05	1.94	64.38	25.20	481.22	
Di-n-octyl phthalate		Mono(2-ethyl-5-oxohexyl) phthalate (MEOHP)	대조군	0.44	100.0	12.84	3.09	12.55	1.27	12.32	9.14	17.24	0.005
			대상군		100.0	40.51	41.40	31.20	1.91	27.46	10.98	212.65	
		Mono(2-ethyl-5-carboxypentyl) phthalate (MECPP)	대조군	0.45	100.0	23.66	3.72	23.41	1.18	25.05	17.75	27.38	0.025
			대상군		100.0	80.08	117.26	53.10	2.15	44.82	22.22	618.37	
Di-isobutyl phthalate		Σ(DEHP 대사체 4종)	대조군		100.0	60.6	10.8	59.8	1.2	60.2	45.6	75.1	0.003
			대상군		100.0	217.5	247.6	162.5	2.0	137.5	60.0	1312.2	
		Mono (3-carboxypropyl) phthalate (MCOP)	대조군	0.96	20.0	0.98	1.04	0.72	2.04	0.61	0.36	2.83	*
			대상군		11.1	1.37	2.43	0.68	2.66	0.48	0.21	11.36	
Di-isobutyl phthalate		Mono-isobutyl phthalate (MIP)	대조군	0.29	0.0	-	-	-	-	-	-	-	*
			대상군		0.0	-	-	-	-	-	-	-	
		Mono-carboxy-isooctyl Phthalate (MCiOP)	대조군	0.52	0.0	-	-	-	-	-	-	-	*
			대상군		25.9	1.58	3.54	0.48	3.56	0.34	0.12	15.93	
Bisphenol A (BPA)		Bisphenol A (BPA)	대조군	0.14	100.0	7.42	8.67	3.69	4.35	2.75	0.45	21.64	0.183
			대상군		96.3	14.27	14.83	8.33	3.28	9.69	0.50	64.90	

환경성 폐늘(Environmental Phenols)

소변		Bisphenol A (BPA)	대조군	0.14	100.0	7.42	8.67	3.69	4.35	2.75	0.45	21.64	0.183
			대상군		96.3	14.27	14.83	8.33	3.28	9.69	0.50	64.90	

시료	모화합물	분석대상물질	그룹	검출한 계	검출빈도 (%)	산술 평균	표준편차	기하 평균	기하 표준 편차	증위 값	최소 값	최대값	p-val
		Bisphenol F (BPF)	대조군	0.17	80.0	3.99	6.59	1.26	6.09	0.94	0.11	15.69	0.921
			대상군		74.1	3.04	3.22	1.16	6.07	1.84	0.04	10.42	
		Bisphenol S (BPS)	대조군	0.42	20.0	0.28	0.11	0.26	1.44	0.26	0.15	0.43	*
			대상군		22.2	0.41	0.47	0.30	1.91	0.27	0.15	2.46	
		Triclosan (TCS)	대조군	1.56	100.0	198.6	233.8	103.5	4.17	135.6	12.4	601.1	0.101
			대상군		96.3	61.7	55.1	40.1	3.0	50.0	0.9	201.4	
		Benzophenon-1 (BP-1)	대조군	0.36	80.0	1.12	0.82	0.83	2.51	1.04	0.30	1.96	0.012
			대상군		96.3	5.46	6.72	3.19	2.83	2.89	0.50	29.43	
		Benzophenon-3 (BP-3)	대조군	0.23	100.0	1.28	1.55	0.79	2.84	0.63	0.29	4.00	0.398
			대상군		92.6	6.06	18.42	1.42	4.27	1.45	0.17	95.77	
		Methyl paraben (Me-P)	대조군	0.53	100.0	13.70	8.7	11.8	1.8	11.4	6.1	28.1	0.004
			대상군		100.0	224.4	259.9	100.2	4.5	108.0	8.4	1059.5	
		Ethyl paraben (Et-P)	대조군	0.41	40.0	0.37	0.19	0.34	1.61	0.26	0.21	0.64	0.220
			대상군		59.3	6.19	21.21	0.91	5.68	0.51	0.10	111.05	
		Propyl paraben (Pr-P)	대조군	0.54	100.0	2.26	0.68	2.17	1.41	2.56	1.29	2.87	0.013
			대상군		92.6	73.77	80.80	23.92	7.48	34.07	0.21	250.63	
		Butyl paraben (Bt-P)	대조군	0.23	40.0	0.39	0.39	0.26	2.33	0.15	0.12	1.02	*
			대상군		18.5	1.37	3.04	0.26	4.73	0.15	0.06	10.90	

유기인계난연제(Organophosphate Flame Retardants)

소변	Tris(2-chloroethyl) phosphate	Bis(2-chloroethyl) phosphate (BCEP)	대조군	0.012	0.0	-	-	-	-	-	-	-	*
			대상군		0.0	-	-	-	-	-	-	-	
	Tris-(1-chloro-2-propyl) phosphate	Bis-(1-chloro-2-propyl) phosphate (BCPP)	대조군	0.029	20.0	1.73	3.83	0.06	1.36	0.02	0.01	8.59	*
			대상군		0.0	-	-	-	-	-	-	-	
	Tris(1,3-dichloro-2-propyl) phosphate	Bis(1,3-dichloro-2-propyl) phosphate (BDCPP)	대조군	0.048	0.0	-	-	-	-	-	-	-	*
			대상군		11.1	0.05	0.09	0.03	2.27	0.03	0.01	0.40	

시료	모화합물	분석대상물질	그룹	검출한 계	검출빈도 (%)	산술 평균	표준편차	기하 평균	기하 표준 편차	증위 값	최소 값	최대값	p-val
	Triphenyl phosphate	Diphenyl phosphate (DPhP)	대조군	0.075	80.0	0.185	0.213	0.125	2.480	0.106	0.048	0.565	0.035
			대상군		92.6	0.344	0.203	0.280	2.051	0.338	0.052	0.905	
	Tri-n-butyl phosphate	Di-n-butyl phosphate (DuBP)	대조군	0.054	80.0	0.050	0.035	0.042	1.966	0.042	0.017	0.108	0.002
			대상군		96.3	0.150	0.138	0.120	1.873	0.122	0.035	0.772	
	Tribenzyl phosphate	Dibenzyl phosphate (DBzP)	대조군	0.040	0.0	-	-	-	-	-	-	-	*
			대상군		0.0	-	-	-	-	-	-	-	
	Tri-o-cresyl phosphate	Di-o-cresyl phosphate (DoCP)	대조군	0.024	0.0	-	-	-	-	-	-	-	*
			대상군		0.0	-	-	-	-	-	-	-	
	Tri-p-cresyl phosphate	Di-p-cresyl phosphate (DpCP)	대조군	0.024	0.0	-	-	-	-	-	-	-	*
			대상군		0.0	-	-	-	-	-	-	-	
	2-Ethylhexyl-2,3,4,5-tetrabromobenzoic acid (TBBA)	2,3,4,5-tetrabromobenzoic acid (TBBA)	대조군	0.085	0.0	-	-	-	-	-	-	-	*
			대상군		14.8	0.086	0.108	0.057	2.186	0.050	0.019	0.507	

다환방향족탄화수소(Polyyclic Aromatic Compounds)

소변	Naphthalene	1-hydroxynaphthalene (1-OH-NAP)	대조군	0.044	100.0	50.04	103.43	6.89	8.42	5.84	1.01	235.01	0.538
			대상군		96.3	26.83	40.30	11.76	5.44	11.87	0.02	194.82	
		2-hydroxynaphthalene (2-OH-NAP)	대조군	0.036	100.0	7.08	5.58	5.31	2.44	4.76	1.53	15.41	0.185
			대상군		100.0	26.21	47.35	11.11	3.16	8.09	2.53	208.26	
	Fluorene	2-hydroxyfluorene (2-OH-FLU)	대조군	0.013	80.0	0.253	0.165	0.155	4.520	0.247	0.011	0.468	0.899
			대상군		66.7	0.406	0.390	0.137	8.013	0.369	0.003	1.717	
		3-hydroxyfluorene (3-OH-FLU)	대조군	0.014	100.0	0.048	0.045	0.037	2.096	0.026	0.021	0.127	0.986
			대상군		74.1	0.066	0.065	0.037	3.403	0.041	0.003	0.266	
	Phenanthrene	1-hydroxyphenanthrene (1-OH-PHE)	대조군	0.007	100.0	0.130	0.043	0.125	1.397	0.121	0.088	0.182	0.043
			대상군		100.0	0.268	0.186	0.224	1.818	0.220	0.065	0.966	
		2-hydroxyphenanthrene (2-OH-PHE)	대조군	0.008	100.0	0.101	0.041	0.094	1.556	0.112	0.051	0.153	0.061
			대상군		100.0	0.251	0.231	0.187	2.126	0.145	0.050	1.124	

시료	모화합물	분석대상물질	그룹	검출한 계	검출빈도 (%)	산술 평균	표준편차	기하 평균	기하 표준 편차	증위 값	최소 값	최대값	p-val
	Pyrene	1-hydroxypyrene (1-OH-PYR)	대조군	0.011	100.0	0.095	0.040	0.088	1.513	0.099	0.058	0.156	0.008
			대상군		100.0	0.303	0.201	0.242	2.147	0.269	0.023	1.026	
	Benzo[a]pyrene	3-hydroxybenzo[a]pyrene (3-OH-BaP)	대조군	0.009	0.0	-	-	-	-	-	-	-	*
			대상군		0.0	-	-	-	-	-	-	-	

과불화화합물(Per- and Polyfluoroalkyl Substance)

혈액	Perfluoropentanoic acid (PFPeA)	대조군	0.008	20.0	0.007	0.004	0.006	1.466	0.005	0.005	0.013	*
		대상군		29.6	0.008	0.006	0.007	1.634	0.005	0.005	0.026	
	Perfluorohexanoic acid (PFHxA)	대조군	0.013	40.0	0.024	0.021	0.017	2.259	0.009	0.009	0.050	*
		대상군		33.3	0.059	0.086	0.023	3.790	0.009	0.009	0.285	
	Perfluorohexanoic acid (PFHpA)	대조군	0.012	0.0	-	-	-	-	-	-	-	*
		대상군		14.8	0.010	0.008	0.009	1.468	0.008	0.008	0.050	
	Perfluorooctanoic acid (PFOA)	대조군	0.007	100.0	0.416	0.080	0.410	1.210	0.426	0.323	0.537	0.944
		대상군		100.0	0.472	0.213	0.418	1.719	0.514	0.115	0.902	
	Perfluorononanoic acid (PFNA)	대조군	0.011	100.0	0.616	0.209	0.590	1.388	0.495	0.445	0.892	0.011
		대상군		100.0	0.294	0.208	0.230	2.131	0.243	0.030	0.879	
	Perfluorodecanoic acid (PFDA)	대조군	0.008	100.0	0.229	0.070	0.220	1.409	0.219	0.127	0.304	0.447
		대상군		96.3	0.291	0.499	0.137	3.839	0.173	0.006	2.636	
	Perfluoroundecanoic acid (PFUdA)	대조군	0.006	100.0	0.804	0.240	0.763	1.483	0.902	0.378	0.958	0.000
		대상군		96.3	0.119	0.095	0.079	2.862	0.087	0.004	0.357	
	Perfluorododecanoic acid (PFDoA)	대조군	0.006	100.0	0.066	0.019	0.064	1.424	0.070	0.035	0.083	0.000
		대상군		70.4	0.017	0.017	0.011	2.487	0.008	0.004	0.070	
	Perfluorotridecanoic acid (PFTrDA)	대조군	0.009	100.0	0.159	0.036	0.156	1.278	0.171	0.108	0.192	0.000
		대상군		66.7	0.020	0.020	0.015	2.075	0.014	0.007	0.097	
	Perfluorotetradecanoic acid (PFTeDA)	대조군	0.012	0.0	-	-	-	-	-	-	-	*
		대상군		3.7	0.009	0.004	0.008	1.275	0.008	0.008	0.029	

시료	모화합물	분석대상물질	그룹	검출한 계	검출빈도 (%)	산술 평균	표준편차	기하 평균	기하 표준 편차	증위 값	최소 값	최대값	p-val
		Perfluorohexadecanoic acid (PFHxDA)	대조군	0.023	0.0	-	-	-	-	-	-	-	*
			대상군		0.0	-	-	-	-	-	-	-	
		Perfluorooctadecanoic acid (PFODA)	대조군	0.013	0.0	-	-	-	-	-	-	-	*
			대상군		3.7	0.013	0.020	0.010	1.618	0.009	0.009	0.115	
		Perfluorobutanesulfonate (PFBS)	대조군	0.017	0.0	-	-	-	-	-	-	-	*
			대상군		22.2	0.016	0.010	0.014	1.484	0.012	0.012	0.056	
		Perfluorohexanesulfonate (PFHxS)	대조군	0.018	100.0	0.297	0.057	0.293	1.210	0.302	0.228	0.383	0.016
			대상군		100.0	0.178	0.134	0.149	1.789	0.147	0.046	0.690	
		Perfluoroheptanesulfonate (PFHpS)	대조군	0.028	100.0	0.086	0.033	0.082	1.439	0.075	0.052	0.139	0.247
			대상군		81.5	0.116	0.324	0.049	2.536	0.040	0.020	1.714	
		Perfluorooctanesulfonate (PFOS)	대조군	0.022	100.0	1.88	0.57	1.81	1.39	1.77	1.10	2.48	0.643
			대상군		100.0	4.87	15.00	1.40	3.32	1.41	0.25	77.54	
		Perfluorodecanesulfonate (PFDS)	대조군	0.011	0.0	-	-	-	-	-	-	-	*
			대상군		0.0	-	-	-	-	-	-	-	

(-: 검출율이 0%인 물질로 데이터 없음; *: 검출율 50% 미만인 물질은 통계분석에서 제외; 물질군별 농도단위: 혈액 중 중금속, 과불화화합물- $\mu\text{g}/\text{L}$, 소변 중 중금속, 프탈레이트, 다환방향족탄화수소 및 유기인계난연제 대사체, 그리고 환경성페놀- $\mu\text{g}/\text{g}$ creatinine)

2.2. 중금속

- 대상군과 대조군의 혈액 및 소변 중 카드뮴, 납, 크롬 및 니켈 농도는 <표 20>과 같다. 작업환경에서의 노출 수준 비교 목적으로 미국 정부산업위생전문가협의회(American Conference of Governmental Industrial Hygienists, ACGIH)에서 권고하는 생물학적 모니터링 기준값 (Biological Exposure Index, BEI) 그리고 일반 인구와 비교하기 위한 목적으로 우리나라와 미국 일반인구(여성)의 대푯값을 함께 제시하였다.
- 기하평균 농도로 비교한 결과, 생물학적 노출 기준보다는 낮은 수준으로 검출되었으며 연구 참여자 중에서도 초과하는 경우는 없었다.
- 중금속 농도는 여성 폐기물 노동자 보다 대조군에서 더 높았다. 특히 혈액 중 카드뮴, 크롬 및 니켈 농도는 통계적으로 유의미한 차이를 보였다($p<0.05$). 이러한 중금속은 작업환경 이외에도 식이섭취, 생활습관, 건축재 등 생활 환경에서도 노출이 가능하다. 설문항목에서 식습관 등을 고려하였으나, 응답 분포가 편중되어 있어서 반영이 불가능하였다.
- 일반인구와 비교한 결과 대상군과 대조군 모두 혈액 중 납 농도가 높았다. 대상군과 대조군의 혈중 납 농도는 각각 27.89, 26.95 $\mu\text{g}/\text{L}$ 로 대상군에서 약간 높았다. 한국 및 미국 일반인 여성의 혈액 중 납 농도는 각각 12.9, 6.64 $\mu\text{g}/\text{L}$ 로, 여성 폐기물 노동자의 혈중 납 농도는 이들 일반인 여성 대비 각각 2배(한국), 4배(미국) 더 높은 수준으로 확인되었다.

<표 20> 대상군과 대조군의 중금속 농도 비교

시료	중금속	기하평균		ACGIH BEI ⁶	KoNESH ¹	NHANES ²	단위
		대상군(N=27)	대조군(N=5)				
혈액	Cd	0.98	1.26 ⁵	5.0	0.683	0.271	$\mu\text{g}/\text{L}$
	Pb	27.89	26.95	200	12.9	6.64	
	Cr	0.55	0.97		³	⁴	
	Ni	2.13	3.54		2.49	-	
소변	Cd	0.25	0.30	5.0	0.790	0.182	$\mu\text{g}/\text{g}$ creatinine
	Pb	0.64	0.83		0.786	0.295	
	Cr	0.29	0.27	0.7 [#]	0.278	*	
	Ni	2.67	2.23	5.0 [#]	2.97	1.40	

1. 한국, 국민환경보건기초조사(Korean National Environmental Health Survey) 5기(2011-2013), 여성

2. 미국, 국민건강영양기초조사(National Health and Nutrition Examination) 2017-2018, 여성

3. 자료없음

4. 검출율 50% 미만인 물질로 기하평균농도 계산 안함.

5. 낮은 수치는 통계적으로 유의한 차이가 있음을 의미함($p<0.05$). 분석시 연령, 그룹, BMI 요인을 보정한 Wald 검정(wald test)을 통해 수행되었음.

6. 미국 정부산업위생전문가협의회 생물학적 모니터링 기준값

#.단위, $\mu\text{g}/\text{L}$

2.3. 프탈레이트

- 프탈레이트 대사체 13종 중 MMP, MBzP, MCPP, MINP, MCiOP을 제외한 8종은 연구참여자의 소변에서 주요하게 검출되었으며, MEP를 제외한 7종은 여성 폐기물 노동자의 소변

중 농도가 대조군보다 더 높았다. 대상군과 대조군의 소변 중 MnBP(DnBP의 대사체) 농도는 각각 68.92, 32.21 $\mu\text{g/g}$ creatinine으로 대상군에서 2배 이상 더 높았다. 그러나 DnBP의 대체물질로 사용되는 DiBP의 대사체인 MiBP 농도는 대상군에서 4.96, 대조군에서 4.24 $\mu\text{g/g}$ creatinine로 거의 유사하였다. 또한 DINP의 대사체 3종 중 주요하게 검출된 MHNP의 소변 중 농도는 대상군과 대조군에서 각각 1.77, 1.17 $\mu\text{g/g}$ creatinine로 대상군에서 약간 높았다.

- 프탈레이트 중 대상군과 대조군의 소변 중 DEHP 대사체 4종(MEHP, MEHHP, MEOHP 및 MECP) 농도는 연령과 BMI 요인 등을 보정한 후 통계적으로 유의한 차이를 보였다 ($p<0.05$). 여성 폐기물 노동자의 소변 중 DEHP 대사체 농도는 종류에 따라 8.36~75.05 $\mu\text{g/g}$ creatinine로 대조군 소변 중 농도, 3.64~23.76 $\mu\text{g/g}$ creatinine보다 2배 이상 더 높았다.
- 여성 폐기물 노동자의 소변에서 더 높은 농도를 보인 DnBP와 DEHP는 플라스틱에 가소제로 첨가되는 화학물질로 유럽연합, 한국 및 미국에서는 이미 사용이 금지되었다. <표 21>에서 보듯이, 이번 여성 폐기물 노동자의 소변 중 DnBP와 DEHP 대사체 농도는 한국과 미국 일반인 여성의 소변 중 농도와 비교해서도 모두 더 높았다. DnBP의 경우 여성 폐기물 노동자의 소변 중 농도는 각각 2.5배(한국), 6.8배(미국) 더 높은 것으로 확인되었다.

<표 21> 대상군과 대조군의 소변 중 프탈레이트 대사체 농도 비교

(단위: $\mu\text{g/g}$ creatinine)

모화합물	대사체	기하평균		KoNESH ¹	NHANES ²
		대상군(N=27)	대조군(N=5)		
Dimethyl phthalate (DMP)	MMP	*	*	3.96	* ⁴
Diethyl phthalate (DEP)	MEP	392.26 ⁵	792.97	5.58	34.80
Di-isobutyl phthalate (DiBP)	MiBP	4.96	4.24	- ³	7.96
Di-n-butyl phthalate (DnBP)	MnBP	68.92	32.81	27.20	10.20
Benzyl butyl phthalate (DBzP)	MBzP	*	*	0.89	3.73
Bis(2-ethylhexyl) phthalate (DEHP)	MEHP	8.36	3.64	-	*
	MEHHP	75.05	23.76	9.06	5.05
	MEOHP	31.20	12.55	5.38	3.38
	MECPP	53.10	23.41	12.70	8.31
Di-n-octyl phthalate (DnOP)	MCPP	*	*	0.48	1.28
Di-isonyl phthalate (DINP)	MiNP	*	*	-	*
	MCiOP	*	*	1.45	5.76
	MHiNP	1.77	1.17	-	-

1.한국, 국민환경보건기초조사(Korean National Environmental Health Survey) 5기(2021-2013), 여성

2.미국, 국민건강영양기초조사(National Health and Nutrition Examination) 2017-2018
(단, MMP:2011-2012), 여성

3.자료없음

4.검출율 50% 미만인 물질로 기하평균농도 계산 안함.

5..굵은 수치는 통계적으로 유의한 차이가 있음을 의미함($p<0.05$). 분석시 연령, 그룹, BMI 요인을 보정한 Wald 검정(wald test)을 통해 수행되었음.

- <표 22>는 기존 연구와 본 연구의 DEHP에 대한 직업적 노출 수준을 비교한 자료이며, 주요 작업별 소변 중 DEHP의 주요 대사체인 MEHHP 농도를 제시한 것이다. 표에서 보듯이, 프탈레이트 제조, PVC 생산 그리고 PVC를 이용한 제품 생산 공정에 종사하는 노동자들의 소변 중 MEHHP 농도는 25.4~151.0 $\mu\text{g/g}$ creatinine 범위로 확인되었다. 특히 본 연구에서 확인된 농도는 중국의 플라스틱 재활용 노동자의 소변 중 농도, 36.8 $\mu\text{g/g}$ creatinine 보다 약 2배 정도 더 높았다.

<표 22> 작업에 따른 소변 중 MEHHP(DEHP 주요 대사체)에 대한 바이오모니터링 연구

참고문헌	국가	작업 내용	n	(단위: $\mu\text{g/g}$ creatinine)				
				기하 평균	기하 표준 편차	최소 값	중위값	최대값
Hines et.(2009)	USA	프탈레이트제조	9	25.4	1.89	10.1	22.1	73
Hines et.(2009)	USA	PVC 필름 제조	25	151.0	2.31	12	138.0	703
Hines et.(2009)	USA	자동차 필터 제조	18	34.6	2.29	32.7	32.4	267
Hines et.(2009)	USA	PVC 컴파운딩	12	102.0	3.05	10.6	164.0	366
Hines et.(2009)	USA	고무호스 제조	25	25.2	2.45	7.77	21.2	455
Hines et.(2009)	USA	고무장화 제조	21	59.5	2.47	8.1	69.9	553
Koch et.(2012b)	Germany	PVC 압출 작업자	5	-	-	5.5	41.4	120
Fong et al.(2014)	Taiwan	PVC 생산, 원료처리공정	66	97.1		10.8	-	677.5
Huang et(2014)	Taiwan	PVC 생산, (PVC와 직접접촉)	36	75.9	1.9	-	78.8	-
Fong et al.(2015)	Taiwan	PVC 생산	82	84.6	2.3	-	78.8	
Wang et al.(2018)	China	플라스틱 폐기물 재활용 노동자	16 5	36.8	-	0.28	38.8	2403.5
This study(2025)	Indonesia	폐기물 노동자	27	75.1	1.94	25.20	64.4	481.2

[출처: Nadine Frery et al., Biomonitoring of occupational exposure to phthalates: A systematic review. International Journal of Hygiene and Environmental Health 229 (2020) 113548]

2.4. 환경성 폐놀

- 비스페놀 화합물 중 BPA와 BPF, 항균제로 사용되는 TCS, UV-안정제로 사용되는 BP-1 및 BP-3 그리고 보존제로 사용되는 파라벤 4종 중 Me-P, Et-P 및 Pr-P 등이 대상군과 대조군의 소변에서 검출되었으며, TCS를 제외한 나머지는 여성 폐기물 노동자 소변 중 농도가 대조군의 소변 중 농도보다 더 높았다. 특히 여성 폐기물 노동자의 소변 중 BP-1, Me-P 및 Pr-P 농도는 각각 3.19, 100.15 및 23.92 $\mu\text{g/g}$ creatinine, 대조군의 소변 중 농도는 각각, 0.83, 11.84 및 2.17 $\mu\text{g/g}$ creatinine으로 각각 3.8배, 8.5배 그리고 2.4배 더 높았으며 통계적으로 유의미하였다($p<0.05$).

- 플라스틱 폴리카보네이트의 원료로 사용되는 BPA의 소변 중 농도는 대상군과 대조군에서 각각 8.33, 3.69 $\mu\text{g/g}$ creatinine으로 대상군에서 2.3배 더 높았으나, 통계적인 유의성은 없었다. 그러나 여성 폐기물 노동자의 소변 중 BPA 농도는 한국과 미국 일반인 여성의 소변 중 농도 0.765, 1.19 $\mu\text{g/g}$ creatinine 보다 각각 11배, 7배 더 높았다.
- 소변 중 Me-P와 Pr-P 농도도 대상군에서 더 높았고, TCS 농도는 반대로 대조군에서 대상군보다 더 높았다($p<0.05$). 파라벤은 화장품이나 개인위생용품, 의약품 및 식품에 보존제 용도로 사용되며, TCS도 화장품이나 개인위생용품에 항균제로 사용된다. 즉 이들 물질은 개인위생용품이 주요 노출원으로 의심되지만 설문에서 조사한 개인위생용품 사용빈도를 활용한 요인 분석에서는 확인이 어려웠다. 인도네시아는 식기 사용 대신에 손을 이용하여 식사하는 문화적 특성상, 평소 손세정제나 항균제 등의 사용 빈도가 두 그룹간 차이가 크지 않았는데, 이러한 요인들이 복합적으로 작용한 것으로 사료된다.

<표 23> 대상군과 대조군의 비스페놀, 항균제, UV-안정제 및 파라벤 농도 비교

물질군	분석대상 물질	기하평균		KoNESH ¹	NHANES ²
		대상군(N=27)	대조군(N=5)		
비스페놀 화합물	BPA	8.33	3.69	0.765	1.19
	BPF	1.16	1.26	0.226	* ⁴
	BPS	*	*	0.373	0.513
항균제	TCS	40.18	103.51	0.148	6.94
UV-안정제	BP-1	3.19 ⁵	0.83	- ³	-
	BP-3	1.42	0.79	0.553	31.6
파라벤	Me-P	100.15	11.84	14.4	64.0
	Et-P	0.91	0.34	31.8	*
	Pr-P	23.92	2.17	0.576	10.3
	Bt-P	*	*	0.444	*

1.한국, 국민환경보건기초조사(Korean National Environmental Health Survey) 5기(2011-2013), 여성

2.미국, 국민건강영양기초조사(National Health and Nutrition Examination) 2015-2016, 여성

3.자료없음

4.검출율 50% 미만인 물질로 기하평균농도 계산 안함.

5..굵은 수치는 비모수 검정(Non-parametric test)결과 통계적으로 유의한 차이가 있음($p<0.05$).

2.5. 유기인계 난연제

- 유기인계 난연제는 브롬화난연제 사용 금지에 따른 대체물질로 플라스틱, 섬유류, 건축재, 전기제품 및 가구류 등에 광범위하게 사용되고 있다. 대사체 9종을 분석한 결과 대상군과 대조군 소변에서는 DPHP와 DBuP 등 2종만 50% 이상에서 검출되었다. DPHP는 난연제 뿐만 아니라 플라스틱에 가소제 용도로 사용되는데, 여성 폐기물 노동자 소변 중 농도는 0.280 $\mu\text{g/g}$ creatinine로 대조군의 소변 중 농도 0.125 $\mu\text{g/g}$ creatinine 보다 2.2배 더 높았으며 통계적으로 유의미한 차이를 보였다($p<0.05$). 그러나 이러한 농도 수준은 미국

일반인 여성의 소변 중 농도 1.14 µg/g creatinine 보다는 낮았다. 대상군과 대조군의 소변 중 DBuP 농도는 각각 0.120, 0.042 µg/g creatinine로, 여성 폐기물 노동자에서 2.9 배 더 높은 것으로 확인되었다.

- <표 24>는 대상군과 대조군의 소변 중 유기인계 난연제 농도를 비교하여 제시하였다.

<표 24> 대상군과 대조군의 소변 중 유기인계난연제 대사체 농도 비교

(단위: µg/g creatinine)

모화합물	대사체	기하평균		KoNESH ¹	NHANES ²
		대상군 (N=27)	대조군 (N=5)		
Tris(2-chloroethyl) phosphate	BCEP	*	*	- ³	0.427
Tris-(1-chloro-2-propyl) phosphate	BCPP	*	*	-	* ⁴
Tris(1,3-dichloro-2-propyl) phosphate	BDCPP	*	*	-	1.44
Triphenyl phosphate	DPhP	0.280 ⁵	0.125		1.14
Tri-n-butyl phosphate	DBuP	0.120	0.042	-	*
Tribenzylphosphate	DBzP	*	*	-	*
Tri-o-cresylphosphate	DoCP	*	*	-	*
Tri-p-cresylphosphate	DpCP	*	*	-	*
2-ethylhexyl-2,3,4,5-tetrabromobenzoate	TBBA	*	*	-	*

1. 한국, 국민환경보건기초조사(Korean National Environmental Health Survey) 5기(2021-2013), 여성

2. 미국, 국민건강영양기초조사(National Health and Nutrition Examination) 2017-2018
(단, DoCP와 DpCP는 2013-2014), 여성

3. 자료없음

4. 검출율 50% 미만인 물질로 기하평균농도 계산 암함.

5. 굵은 수치는 통계적으로 유의한 차이가 있음을 의미함($p<0.05$). 분석시 연령, 그룹, BMI 요인을 보정한 Wald 검정(wald test)을 통해 수행되었음.

2.6. 다환방향족탄화수소

- 나프탈렌(Naphthalene), 플로오렌(Fluorene), 페난쓰렌(Phenanthrene), 파이렌(Pyrene) 및 벤조(a)파이렌(Benzo(a)pyrene) 등 5종의 다환방향족탄화수소 대사체 8종을 분석한 결과, 벤젠(a)파이렌의 소변 중 대사체, 3-OH-BaP를 제외한 7종은 대상군과 대조군에서 모두 검출되었다. 대상군과 대조군의 다환방향족탄화수소 대사체 농도는 <표 25>와 같다.
- 나프탈렌 대사체인 1-OH-NAP와 2-OH-NAP 농도 그리고 페난쓰렌 대사체인 1-OH-PHE와 2-OH-PHE 농도는 대상군에서 대조군보다 더 높았지만, 통계적인 유의성은 없었다 ($p>0.05$).
- 그러나 파이렌의 대사체, 1-OH-PYR의 소변 중 농도는 대상군 0.242, 대조군 0.088 µg/g creatinine로 여성 폐기물 노동자가 대조군보다 2.7배 더 높았다.
- 다환방향족탄화수소는 플라스틱에서 유래되거나 폐기물을 소각하는 과정에서 발생하며, 발암성 물질이다. 2024년 IPEN은 태국의 플라스틱 폐기물 노동자와 재활용 노동자를 대상으로 플라스틱에서 유래되는 화학물질에 대한 노출을 평가하였다. 다환방향족탄화수소를 평가

한 결과, 특히 페난쓰렌, 플로란센 및 파이렌 등 3종이 폐기물 노동자와 재활용 노동자에서 주요하게 노출되는 물질로 보고하였는데, 이러한 결과는 본 연구에서 확인한 여성 폐기물 노동자의 바이오모니터링 결과와 일치하고 있다.

<표 25> 대상군과 대조군의 소변 중 다환방향족단화수소 대사체 농도 비교

(단위: $\mu\text{g/g}$ creatinine)

모화합물	대사체	기하평균		KoNESH ¹	NHANES ²
		대상군(N=27)	대조군(N=5)		
Naphthalene	1-OH-NAP	11.76	6.89	- ³	1.84
	2-OH-NAP	11.11	5.31	2.81	6.14
Fluorene	2-OH-FLU	0.137	0.155	0.147	0.214
	3-OH-FLU	0.037	0.037	-	0.092
Phenanthrene	1-OH-PHE	0.224	0.125	0.069	0.124
	2-OH-PHE	0.187	0.094	-	0.073
Pyrene	1-OH-PYR	0.242 ⁵	0.088	0.062	0.150
Benzo[a]pyrene	3-OH-BaP	* ⁴	*	-	-

1. 한국, 국민환경보건기초조사(Korean National Environmental Health Survey) 5기(2011-2013), 여성

2. 미국, 국민건강영양기초조사(National Health and Nutrition Examination) 2015-2016
(단, 2-OH-PHE는 2011-2012), 여성

3. 자료없음

4. 검출율 50% 미만인 물질로 기하평균농도 계산 안함.

5. 굵은 수치는 통계적으로 유의한 차이가 있음을 의미함($p<0.05$). 분석시 연령, 그룹, BMI 요인을 보정한 Wald 검정(wald test)을 통해 수행되었음.

2.7. 과불화화합물

- 대상군과 대조군 혈청 중 과불화화합물 농도는 <표 26>과 같다. 분석대상물질 17종 중 PFOA, PFNA, PFDA, PFUDA, PFDoA, PFTDA, PFHxS, PFHpS 및 PFOS 등 9종이 참여자의 50% 이상에서 검출되었다. 특히 PFOA, PFNA, PFHxS 및 PFOS 등은 대상군과 대조군의 체내에서 100% 검출되었다.
- 과불화화합물의 체내 농도는 앞에서 검토했던 다른 분석대상물질과는 달리 상반된 양상을 나타냈다. 다수의 물질에서 여성 폐기물 노동자보다 대조군에서 더 높은 농도가 관찰되었으며, 특히 PFNA, PFUDA, PFDoA, PFTDA 그리고 PFHxS 등은 대조군에서의 농도가 통계적으로 유의미하게 높았다($p<0.05$). 농도 수준이 가장 높은 PFNA의 경우 대조군의 혈청 농도는 $0.590 \mu\text{g/L}$ 로, 대상군의 혈청 농도 $0.230 \mu\text{g/L}$ 보다 2배 이상 더 높았다.
- 또한 한국과 미국 일반인 여성의 농도보다 낮은 수준으로 관찰되었다. 잔류성오염유기물질 (Persistent Organic Pollutants, POPs)로 사용이 금지된 물질 중 하나인 PFOS의 혈청 농도는 대상군과 대조군에서 각각 1.399 , $1.806 \mu\text{g/L}$ 으로 대조군에서 더 높았다. 이러한 농도 수준은 한국 일반인 여성의 혈청 농도 $10.4 \mu\text{g/L}$ 보다는 5.8배 그리고 미국 일반인 여성의 혈청 농도 $3.42 \mu\text{g/L}$ 보다는 1.9배 더 낮은 수준이었다.

<표 26> 대상군과 대조군의 혈액 중 과불화화합물 농도 비교

(단위: $\mu\text{g}/\text{L}$)

PFAS	분석대상물질	기하평균		KoNESH ¹	NHANES ²
		대상군(N=27)	대조군(N=5)		
Perfluoroalkyl carboxylic acids (PFCA)	PFPeA	*	*	- ³	-
	PFHxA	*	*	-	* ⁴
	PFHpA	*	*	-	*
	PFOA	0.418	0.410	6.490	1.26
	PFNA	0.230 ⁴	0.590	1.840	0.384
	PFDA	0.137	0.220	0.837	0.196
	PFUdA	0.079	0.763	-	0.128
	PFDoA	0.011	0.064	-	*
	PFTrDA	0.015	0.156	-	-
	PFTeDA	*	*	-	-
	PFHxDA	*	*	-	-
Perfluoroalkyl sulfonic acids (PFSA)	PFODA	*	*	-	-
	PFBS	*	*	-	*
	PFHxS	0.149	0.293	3.460	0.805
	PFHpS	0.049	0.082	-	0.178
	PFOS	1.399	1.806	10.400	3.42
	PFDS	*	*	-	-

1.한국, 국민환경보건기초조사(Korean National Environmental Health Survey) 5기(2021-2013), 여성

2.미국, 국민건강영양기초조사(National Health and Nutrition Examination) 2017-2018

(단, PFHpA와 PFBS는 2013-2014, PFDoA는 2015-2016), 여성

3.자료없음

4.검출율 50% 미만인 물질로 기하평균농도 계산 안함.

5.굵은 수치는 통계적으로 유의한 차이가 있음을 의미함($p<0.05$). 분석시 연령, 그룹, BMI 요인을 보정한 Wald 검정(wald test)을 통해 수행되었음.

3. 결론 및 제안

- 이번 연구는 작업환경에서 여성 폐기물 노동자의 플라스틱 유래 화학물질에 대한 체내 노출을 바이오모니터링을 통해 직접적으로 확인하였다. 인도네시아 여성 폐기물 노동자 27명 그리고 일반 여성 5명 등 32명의 혈액과 소변에서 중금속, 프탈레이트, 환경성페놀, 유기인 계난연제, 다환방향족탄화수소 그리고 과불화화합물 등 6개 화학물질군 총 65종을 분석하였다. 결과를 요약하면 다음과 같다.
- 첫째, 여성 폐기물 노동자와 일반 여성 모두의 소변 및 혈액에서 납(Pb), 카드뮴(Cd), 크롬(Cr) 및 니켈(Ni), 프탈레이트 대사체 6종(MEP, MnBP, MEHP, MEHHP, MEOHP 및 MECPP), 환경성 페놀 1종(Me-P), 다환방향족탄화수소 대사체 4종(2-OH-NAP, 1-HO-PHE, 2-OH-PHE 및 1-HO-PYR) 그리고 과불화화합물 4종(PFOA, PFNA, PFHxS 및 PFOS) 등 23종은 100% 검출되었다. 결과적으로 다양한 화학물질이 일반인 뿐만 아니라 폐기물 노동자의 체내에서도 광범위하게 존재하고 있음을 의미하며, 일상적인 생활환경

에서의 노출과 직업적 노출이 동시에 작동할 수 있음을 시사한다.

- 둘째, 바이오모니터링 결과를 통해 여성 폐기물 노동자들은 플라스틱에서 유래되는 화학물질에 직업적으로 노출되고 있음을 확인하였다. 특히 소변 중 DEHP(플라스틱 가소제)와 유기인계난연제의 농도가 유의하게 높게 나타났으며, 플라스틱을 소각하는 과정에서 발생하는 다환방향족탄화수소 지표물질인 1-OH-Pyrene 또한 여성 폐기물 노동자에서 더 높은 농도로 검출되었다. 이러한 결과는 폐기물 처리 작업이 화학물질의 체내 축적 위험을 증가시킬 수 있음을 시사한다.
- 셋째, 본 연구는 시료 규모가 적은 한계 때문에 식습관이나 생활습관 등 개별 요인을 활용한 영향요인 분석에 충분히 활용하지 못하였다. 중금속이나 비스페놀 화합물 등의 결과를 보다 포괄적이고 정밀하게 해석하는 데 있어서 제약이 있었다. 그럼에도 불구하고 이번 결과는 인도네시아 여성 폐기물 노동자의 화학물질에 대한 체내 축적을 확인한 과학적인 증거를 제시하였다는 점에서 중요한 의의를 갖는다.

VI. 기대효과 및 활용방안

1. 분석 결과 리뷰 및 공유

1.1. 전문가 리뷰 (내외부)

- 본 연구의 최종 분석 결과는 노동환경건강연구소 내부 분석팀의 검토를 거친 후, 환경보건·산업의학·생물통계 등 관련 분야 외부 전문가에게 자문을 받아 결과의 타당성 및 해석의 신뢰성을 확보하였다.
- 특히, 박정임 교수(환경보건학)가 분석자료를 기반으로 심층 검토를 제공하였으며, 이를 통해 생체시료 분석의 통계적 유의성, 노출 특성의 해석, 정책적 시사점 등을 재정비하였다.

1.2. ECOTON과 리뷰

- 분석 결과는 인도네시아 현지 협력기관인 ECOTON과 2025년 11월 21일(금) 오후 3시 온라인 세션을 통해 공유 및 공동 검토를 완료하였다.
- ECOTON은 그레식 지역 폐기물 노동자의 생활 맥락, 현장 위험요인, 비공식 소각 및 분류 관행에 대한 풍부한 정보를 기반으로 결과 해석의 현지 적합성을 보완하였다.

2. 연구 결과 활용 계획

본 연구에서 도출된 바이오모니터링 분석 결과는 국내외 정책 논의, 시민사회 연대, 현지 커뮤니티 교육 등 다양한 경로를 통해 활용될 예정이다. 다만, 인도네시아 세관의 시료 반출 지연으로 분석 일정이 당초 계획보다 늦어져 일부 활동은 연기되었으며, 분석 완료 이후 순차적으로 추진할 계획이다.

2.1. 국제 플라스틱 협약 정부간협상위원회 회의 기자회견

- 본 연구팀은 2025년 8월 개최 예정인 제5.2차 플라스틱오염 정부간 협상위원회 (Intergovernmental Negotiating Committee, INC 5.2) 기간 중 연구 결과를 발표하여 플라스틱 오염 및 유해물질 노출의 과학적 근거를 국제사회에 제시할 계획이었으나, 시료 반출 및 MTA 승인 지연으로 분석 일정이 미뤄짐에 따라, INC 5.2 기자회견에서는 본 연구 결과를 공개하지 못하였다. 향후 INC 5.3 회의 또는 국제 시민사회 네트워크(IPEN 등)를 통해 연구 결과를 공유하는 방안을 지속적으로 모색할 예정이다.

2.2. 보도자료 배포 (한국어, 바하사)

- 연구결과는 이해관계자의 인식 제고와 정책 촉진을 위해 다양한 언어·매체를 활용한 대중 홍보 활동을 계획하고 있다.
 - : 언론보도: 경향신문과의 협업을 통해 심층보도 (3편 보도 완료)
 - : 시각 자료: 카드뉴스·인포그래픽 등 정책 메시지 전달용 시각자료 제작

- : 미디어 확산: 다큐멘터리를 통해 그레식 여성 폐기물노동자의 목소리와 유해노출 실태를 전할 예정
- 시료 반출 지연으로 분석 완료 시점이 늦어져 위 활동은 현재 미진행 상태이며, 연구 결과 확정 이후 2025년 12월 내 제작을 완료하고 기금에 공유할 계획이다.

<표 27> 언론보도 기사

제목	날짜
쓰레기산에서 선별장에서…플라스틱을 만지고 들이쉬는 여성들	2025. 7. 14
‘쓰레기의 종착지’에서 모녀가 꿈꾸는 세상	2025. 7. 14
플라스틱 수거 노동자 체내에서 유해화학물질 검출…“플라스틱 줄여야”	2025. 11. 25



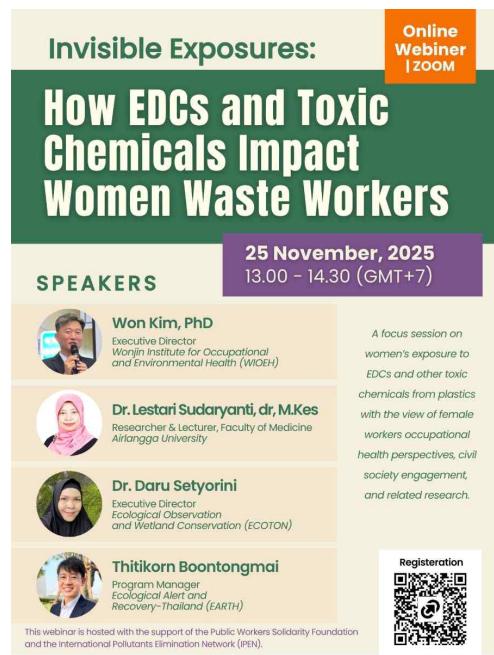
[그림 23] 언론보도 기사 캡처

2.3. 온라인 컨퍼런스(웨비나) 진행

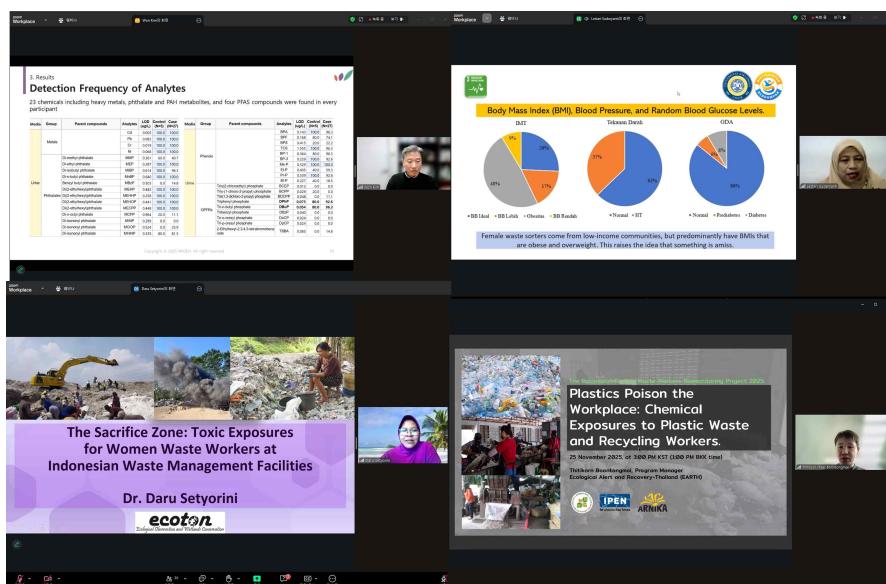
- 본 연구 결과는 동남아시아 지역 여성 폐기물 노동자의 유해물질 노출 문제를 국제 시민사회 및 정책 커뮤니티와의 공유를 위해 2025년 11월 25일 오후 3시(한국시간 기준) 개최된 온라인 웨비나 “Invisible Exposures: How EDCs and Toxic Chemicals Impact Women Waste Workers”에서 공식 발표되었다.
- 본 행사에서는 인도네시아 여성 폐기물노동자 바이오모니터링 연구의 주요 결과를 최초로 공개하였으며, 플라스틱 기반 유해물질(EDCs, PFAS, 프탈레이트, 난연제 등)의 체내 검출과 그 건강적·정책적 함의를 중심으로 심층 논의가 이루어졌다. 또한 태국 사례 발표를 통해 동남아시아 지역 전체의 플라스틱 오염·유해노출 문제를 비교·확장하며 논의를 심화하였다.

<표 28> 웨비나 발표 구성

주제	발표기관	발표자
인도네시아 여성 폐기물노동자 체내 EDCs·유해물질 검출 결과 소개	노동환경경간연구소	김원 소장
EDCs가 여성 건강(생식·호르몬·발달)에 미치는 영향	Airlangga University	Dr. Lestari Sudaryanti,
그레식 지역 여성 폐기물노동자의 실제 노동환경 위험요인	ECOTON	Dr. Daru Setyorini
태국 재활용 노동자의 플라스틱 화학물질 노출 사례 연구	EARTH Thailand	Thitikorn Boontongmai



[그림 24] 국제웨비나 홍보 포스터



[그림 25] 웨비나 발표자 발표내용 캡쳐

2.4. 현지 연구참여자 및 이해관계자(정부, 지역커뮤니티) 설명회

- 연구 결과는 인도네시아 현지에서 ECOTON 주관으로 연구참여자, 지방정부(그레식 자원순환과), 지역 커뮤니티를 대상으로 커뮤니티 설명회 형식으로 공유될 예정이다. 해당 설명회는 연구 결과를 지역의 실질적 정책 제안 및 개선활동으로 연결하기 위해 마련되었다.
- 그레식 자원순환과의 정기적 논의를 통해 폐기물 수거체계 개선, 작업장 안전기준 강화, 여성 노동자 보호정책 반영 등의 정책 제안을 지속적으로 추진할 계획이다.

3. 기대효과

3.1. 여성 폐기물 수거 여성 노동자들의 유해물질 노출 실태를 밝히고 정의로운 전환(Just Transition)을 위한 과학적 근거를 마련

- 본 연구는 플라스틱 폐기물 처리 과정에서 여성 폐기물 노동자들이 겪는 유해화학물질 노출 실태를 처음으로 체계적으로 규명한 조사로, 향후 정의로운 전환(Just Transition)을 실현하기 위한 핵심적인 과학적 근거를 제공한다. 본 연구결과는 여성 노동자의 건강 보호를 위한 캠페인, 폐기물 관리 정책 개선, 노동환경 기준 강화 등 다양한 제도적 변화를 촉진하는 기반으로 활용될 수 있다.
- 본 연구는 그레식(Gresik) 지역 여성 폐기물 노동자의 체내에서 프탈레이트, BPA, 난연제(OPFR), PFAS, 중금속, PAHs 등 플라스틱 기반 유해물질이 검출됨을 규명함으로써, 플라스틱 오염이 여성 노동자에게 미치는 건강영향을 실증적으로 드러냈다. 이는 폐기물 선별·소각·재활용 과정에서 반복적·직접적 노출을 겪는 여성 노동자들의 건강을 보호하기 위한 정책 개입의 필요성을 명확히 보여준다.
- 본 연구에서 도출된 노출 경로와 체내 농도 정보는 국가 및 지방정부가 노동자의 안전을 위한 보호 장비(PPE), 세척 시설(washing facility), 안전한 식사 제공제도 등 기본적인 노동환경 개선을 제도화하는 데 필요한 과학적 증거로 활용될 수 있다. 이는 인도네시아 2008년 폐기물관리법(Waste Management Law)의 개정 및 보완 논의에도 근거자료로 제공될 수 있다.
- 본 연구결과는 협력기관 ECOTON이 추진 중인 정책 옹호(advocacy) 전략의 핵심 근거자료로 활용된다. ECOTON은 이번 바이오모니터링 결과를 기반으로 다음과 같은 제도적 변화를 추구하고 있다.

1) 플라스틱 첨가제(중금속·프탈레이트·BPA 등) 규제 강화

- 여성 노동자의 체내에서 검출된 EDCs(내분비계 교란물질) 농도를 근거로, 플라스틱 제품 제조 단계에서 위험 첨가제 사용 제한을 요구할 계획이다.

2) 전국적 ‘개방형 소각(open burning)’ 전면 금지 제도화

- 여성 노동자에게서 높게 검출된 PAHs 수치를 과학적 근거로 제시하여, 모든 재활용시설 및 폐기물 집하장(TPS)에서의 소각행위를 법적으로 금지할 것을 촉구한다.

3) 유기성 폐기물 분리 배출 의무화(Mandatory Organic Waste Segregation)

- 혼합 폐기물로 인한 병원균 및 화학물질 노출을 줄이고, 재활용품 품질 향상·노동자 소득 증대 등 환경·경제적 이익을 동시에 실현하기 위한 핵심 정책으로 추진할 계획이다.

4) 폐기물 노동자 보호 의무 도입

- PPE 지급 의무화, 손·신체 세척시설 설치, 유해노출 모니터링, 안전교육 의무화 등 노동자 안전을 법률에 명시하는 방안을 제안할 예정이다.

5) 여성 중심 정의로운 전환(Just Transition for Women Waste Workers)

- 여성 노동자 특유의 생식·호르몬·발달 건강 취약성을 반영하여, 여성 폐기물 노동자를 위한 노동권 보장·건강 모니터링·사회보호 체계 강화 등 성인지적 지원 정책을 추진한다.

6) 지방정부-시민사회-학계 연계 의사결정 구조 강화

- ECOTON은 본 연구결과를 활용해 그레식 지방정부, 보건부, 의회 등과 정책 논의를 재개하고 지속적 환류 구조를 마련할 계획이다.

3.2. 국내외 플라스틱 사용과 폐기가 인간 건강에 미치는 영향 전파

- 플라스틱 사용과 폐기가 미치는 영향을 알리는 계기가 될 것으로 기대된다. 특히, 2024년 11월에 부산에서 플라스틱의 전 생애주기에 대한 포괄적인 접근 방식을 바탕으로 플라스틱 오염에 대한 법적 구속력이 있는 기구를 개발하기 위해 제5차 정부 간 협상 위원회 (Intergovernmental Negotiating Committee 5; INC 5)가 열렸다. 제5차 위원회가 마지막이 될 것으로 전망되었으나 별다르 성과 없이 협약이 성안되지 못했다. 2025년 8월에 INC5.2가 스위스에서 개최되었으나 역시 협약이 성안되지 못하고 다음 위원회로 넘겨졌다. 향후 INC5.3 혹은 INC6이 개최되겠지만 산유국과 플라스틱 제조국에서 플라스틱 생산 조절과 규제에 대해 강하게 반대하고 있어 모든 국가에게 적용되는 플라스틱 국제협약이 만들어지는 것이 쉽지 않을 전망이다. 국제협약이 만들어지는 것도 중요하지만 플라스틱으로 인한 피해를 가장 직접적으로 받게 되는 폐기물 노동자들의 건강을 보호하기 위한 조치를 마련하는 것도 협약에서 다루어야 한다. 향후 진행될 INC5.3 혹은 INC6에서 전세계적으로 사용되고 폐기되는 플라스틱이 폐기물 수입국의 폐기물 수거 여성노동자들에게 어떤 영향을 미칠 수 있는지를 최대한 공유하고자 한다. 이를 통해 그들의 건강을 적극적으로 보호하기 위한 정책 마련에 필요한 과학적인 근거를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

- 국내 시민들에게도 플라스틱의 사용 및 폐기가 미치는 영향을 공유하고 플라스틱을 줄이고 제한하기 위한 노력이 필요하다는 인식을 확산시킬 수 있을 것이다. 시민들의 인식전환으로 얻어진 사회적 기대는 보다 안전한 사회로 나아가는데 큰 동력으로 작용할 것이다.
- 인도네시아 그레식 지역 여성 폐기물 노동자들의 플라스틱 유래 유해물질 노출 실태는 한국의 폐기물 처리 노동 환경의 위험 인식 및 평가에도 중대한 시사점을 제공한다. 이번 연구는 폐기물 선별 작업을 통해 가소제인 DEHP나 유기인계 난연제 등 플라스틱에서 유래

하는 유해화학물질이 직업적으로 노출될 수 있음을 과학적으로 규명하였다. 한국은 분리배출 시스템이 비교적 잘 갖춰져 있으나, 국내의 재활용 선별장 노동자들 역시 플라스틱에서 유래하는 유해물질에 노출될 위험이 있다. 더구나 선별 노동자 대부분이 여성노동자들이기 때문에 환경호르몬 노출에 민감한 직업군이라고 할 수 있다. 따라서 인도네시아 폐기물 처리 노동자들을 대상으로 한 본 연구의 사례와 마찬가지로 국내 폐기물 선별 노동자들에 대한 정밀한 바이오모니터링 노출 평가가 기획될 필요가 있다. 이를 통해 폐기물선별 노동환경의 위험성을 정확하게 평가하고 그 결과에 따른 개선조치를 마련할 필요가 있다.

3.3. 유해물질 관리 및 대응할 수 있는 네트워크 구축

- 생활 속 깊숙이까지 침투한 유해물질에 공동으로 대응할 수 있는 네트워크가 구성된다는 것이다. 특히, 남반구에 집중되고 있는 유해물질의 피해에 대해서 공동으로 대응할 수 있는 네트워크를 만드는 것은 매우 중요하다. 공동의 대응은 보다 효과적인 메시지 전달이 가능한 구조가 될 것이고 보다 안전한 사회를 만들기 위한 서로의 경험과 노하우가 공유되는 장이 될 것이기 때문이다.
- 유해물질의 피해는 항상 규제가 약한 곳으로 흘러가고 피해에 대응할 수단과 힘이 없는 곳에 집중되어 왔다. 특히, 플라스틱의 경우, 북반구 국가들이 제조하고 이익을 얻어갔지만, 그 피해는 고스란히 남반구를 향하고 있다. 게다가 사회적 경제적, 그리고 젠더적 약자인 여성 노동자들이 그 피해의 중심에 자리하고 있다. 본 조사를 통해서 그들의 피해를 과학적으로 증명하고 그 근거를 바탕으로 그들을 보호하는 조치가 마련될 수 있도록 사회적의 제화하는 것이 근본적으로 기대하는 바이다.

VII. 부록

1. 참고문헌

- Binion, E.; Gutberlet, J., The effects of handling solid waste on the wellbeing of informal and organized recyclers: a review of the literature. International journal of occupational and environmental health 2012, 18 (1), 43-52.
- Centers for Disease Control and Prevention (CDC), 2009. 「Laboratory Procedure Manual; Bisphenol A and other environmental phenols in urine」
- Centers for Disease Control and Prevention (CDC), 2013. 「Laboratory Procedure Manual; Metabolites of phthalate and phthalate alternatives」
- Cruvinel, V. R. N.; Marques, C. P.; Cardoso, V.; Novaes, M. R. C. G.; Araújo, W. N.; Angulo-Tuesta, A.; Escalda, P. M. F.; Galato, D.; Brito, P.; da Silva, E. N., Health conditions and occupational risks in a novel group: waste pickers in the largest open garbage dump in Latin America. BMC Public Health 2019, 19 (1), 581.
- Ferronato, N.; Torretta, V., Waste Mismanagement in Developing Countries: A Review of Global Issues. International journal of environmental research and public health 2019, 16 (6).
- Geyer, R.; Jambeck, J. R.; Law, K. L., Production, use, and fate of all plastics ever made. Science Advances 2017, 3(7), e1700782.
- Gutberlet, J., Global plastic pollution and informal waste pickers. Cambridge Prisms: Plastics, 2023, 1, e9
- Gutberlet, J.; Baeder, A. M., Informal recycling and occupational health in Santo André, Brazil. International journal of environmental health research 2008, 18 (1), 1-15.
- Gutberlet, J.; Baeder, A. M.; Pontuschka, N. N.; Felipone, S. M. N.; Dos Santos, T. L. F., Participatory Research Revealing the Work and Occupational Health Hazards of Cooperative Recyclers in Brazil. International journal of environmental research and public health 2013, 10 (10), 4607-4627.
- <https://behanbox.com/2023/08/17/women-waste-pickers-jeopardise-their-lives-for-as-little-as-rs-100-a-day/> (accessed 24 August).
- International Pollutants Elimination Network(IPEN), 2024. Plastics poison in the workplace.

Joshua, N. E.; Olatunde, S. D.; John, O. O., Assessment of Heavy Metals in Landfill Leachate: A Case Study of Thohoyandou Landfill, Limpopo Province, South Africa. In Heavy Metals, Hosam El-Din, M. S.; Refaat, F. A., Eds. IntechOpen: Rijeka, 2018; p Ch. 13.

Kaza, S.; Yao, L.; Bhada-Tata, P.; Van Woerden, F., What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050. World Bank Publications: 2018

Kuklenyik et al. Automated Solid-Phase Extraction and Measurement of Perfluorinated Organic Acids and Amides in Human Serum and Milk. *Environ. Sci. Technol.* 2004, 38: 3698-3704

Martin Wagner, Laura Monclús, Hans Peter H. Arp, Ksenia J. Groh, Mari E. Løseth, Jane Muncke,

Medina, M., Waste picker cooperatives in developing countries. In Membership based organizations of the poor, Routledge: 2007; pp 105-121.

Morais, J.; Corder, G.; Golev, A.; Lawson, L.; Ali, S., Global review of human waste-picking and its contribution to poverty alleviation and a circular economy. *Environmental Research Letters* 2022, 17 (6), 063002.

Nadine Frery et al., Biomonitoring of occupational exposure to phthalates: A systematic review. *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 229 (2020) 113548

Organisation for Economic Cooperation Development, Global plastics outlook: Economic drivers, environmental impacts and policy options. OECD Publishing: 2022.

Pales, A. F.; Levi, P., The Future of Petrochemicals: Towards More Sustainable Plastics and Fertilisers. International Energy Agency: Paris, France 2018

Tranfo, Giovanna, et al. Urinary phthalate monoesters concentration in couples with infertility problems. *Toxicology letters*. 2012; 213.1: 15-20.

Tupe, P. Women Waste Pickers Jeopardise Their Lives For As Little As Rs 100 A Day.

Uddin, S. M. N.; Gutberlet, J., Livelihoods and health status of informal recyclers in Mongolia. *Resources, Conservation and Recycling* 2018, 134, 1-9.

Uhunamure, S. E.; Edokpayi, J. N.; Shale, K., Occupational Health Risk of Waste Pickers: A Case Study of Northern Region of South Africa. *Journal of environmental and public health* 2021, 2021, 5530064

- United Nations Environment Programme and Secretariat of the Basel, Rotterdam and Stockholm Conventions (2023). Chemicals in plastics: a technical report. Geneva.
- Velis, C. A.; Cook, E., Mismanagement of plastic waste through open burning with emphasis on the global south: a systematic review of risks to occupational and public health. *Environmental Science & Technology* 2021, 55 (11), 7186-7207.
- Tranfo, G., Caporossi, L., Paci, E., Aragona, C., Romanzi, D., De Carolis, C., ... & Pera, A. (2012). Urinary phthalate monoesters concentration in couples with infertility problems. *Toxicology letters*, 213(1), 15-20.
- Wang, Y., Li, W., Martínez-Moral, M. P., Sun, H., & Kannan, K. (2019). Metabolites of organophosphate esters in urine from the United States: concentrations, temporal variability, and exposure assessment. *Environment international*, 122, 213-221.
- Kuklenyik, Z., Reich, J. A., Tully, J. S., Needham, L. L., & Calafat, A. M. (2004). Automated solid-phase extraction and measurement of perfluorinated organic acids and amides in human serum and milk. *Environmental science & technology*, 38(13), 3698-3704.
- Xu, R. F., Mei, H., Chen, L., Tang, B., Lu, Q. Y., Cai, F. S., ... & Yu, Y. J. (2023). Development and validation of an HPLC-MS/MS method for the simultaneous analysis of volatile organic compound metabolites, hydroxylated polycyclic aromatic hydrocarbons, and 8-hydroxy-2'-deoxyguanosine in human urine. *Journal of Chromatography B*, 1229, 123885.
- Yu Wang et al. Metabolites of organophosphate esters in urine from the United States: Concentrations, temporal variability, and exposure assessment. *Environment International*. 2019; 122: 213-221.
- Zhanyun Wang, Raoul Wolf, Lisa Zimmermann (2024) State of the science on plastic chemicals - Identifying and addressing chemicals and polymers of concern, <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.10701706>.
- Zolnikov, T. R.; Furio, F.; Cruvinel, V.; Richards, J., A systematic review on informal waste picking: Occupational hazards and health outcomes. *Waste Management* 2021, 126, 291-308.

주 의

1. 이 보고서는 재단법인 공공상생연대기금에서 시행한 노동 연구 지원사업으로 수행된 최종 연구보고서입니다.
2. 이 최종보고서의 내용을 대외적으로 발표하거나 인용할 때에는 반드시 재단에서 시행한 노동 연구 지원사업의 결과임을 밝혀야 합니다.
3. 본 연구의 주장이나 제언은 연구진의 견해이며, 재단법인 공공상생연대기금의 공식 입장이 아닙니다.