



Original Article

폐기물 소각장 주변 지역 주민의 PBDEs 노출

박동윤¹ , 이재관^{1,2*}

¹인제대학교 환경·산업의학연구소, ²부산백병원 직업환경의학과

Exposure to PBDEs among Residents Living in an Area Around a Solid Waste Incinerator

Dong Yun Park¹ and Chae Kwan Lee^{1,2*}

¹Institute of Environmental and Occupational Medicine, Medical School, Inje University, ²Department of Occupation and Environmental Medicine, Busan Paik Hospital, Inje University

ABSTRACT

Background: Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) are used as flame retardants. Wastes burned in solid waste incinerators may contain flame retardants such as PBDEs. Therefore, it is important to study the PBDE exposure of residents in areas around solid waste incinerators.

Objectives: This study aimed to analyze the serum PBDE concentration of residents living in an area around a solid waste incinerator and evaluate the factors that could affect PBDE exposure.

Methods: The study areas included an exposure area around a solid waste incinerator and a control area (8.6 km away from the exposure area). Participants were 196 women in their 40s, 50s, and 60s, with 98 from each area. The survey investigated participants' age, period of residence, drinking and smoking habits, menopause status, and parity. The medical examination included body mass index (BMI), thyroid stimulating hormone (TSH), and free thyroxine (Free T4). Twenty-two PBDE congeners were analyzed using gas chromatography (Agilent 7890B, Agilent, USA) and mass spectrometry (Xevo TQ-XS, Waters, USA). Mann-Whitney U and Kruskal-Wallis tests were used to compare the significant differences in serum PBDE concentrations by the characteristics of the participants. Multiple regression analysis was performed to evaluate the factors affecting PBDE exposure and the effect of serum PBDE concentration on TSH levels in serum (SAS 9.4).

Results: There was a statistically significant difference in serum PBDE concentration by area, age, smoking habits, and menopause status. In the multiple regression analysis result, only the residential area was associated with the serum PBDE concentration. The serum TSH concentration was not associated with serum PBDE concentrations.

Conclusions: The serum PBDE concentration of residents in the area around the solid waste incinerator was significantly higher than that of those in the control area. Based on this result it was assessed that the serum PBDE concentration of residents around the solid waste incinerator were affected by the incinerator.

Key words: PBDE exposure, residential area, serum PBDEs, solid waste incinerator

Received July 17, 2024

Revised September 19, 2024

Accepted September 23, 2024

Highlights:

- Serum PBDEs concentration in residents living near solid waste incinerators are higher than general urban areas.
- Serum PBDEs concentration was highly associated with residential area.
- Serum thyroid stimulating hormone (TSH) concentration was not associated with serum PBDEs concentration.

*Corresponding author:

Institute of Environmental and Occupational Medicine, Department of Occupation and Environmental Medicine, Busan Paik Hospital, Inje University, 75 Bokji-ro, Busnjin-gu, Busan 47392, Republic of Korea
Tel: +82-51-890-5931
Fax: +82-51-895-7040
E-mail: lck3303@daum.net

I. 서 론

난연제(flame retardants)는 플라스틱, 전기·전자제품, 가구, 건축자재 제조 시 첨가하는 화학물질이며, 화재나 화염을 방지, 억제하기 위해 사용한다. 난연제는 구성 성분에 따라 브롬계, 염소계, 인계 등으로 분류하며,¹⁾ 특히 브롬계 난연

제(brominated flame retardants, BFRs) 중에서 PBDEs (polybrominated diphenyl ethers)는 방염 효과가 우수하고 저렴하여 1970년대부터 광범위하게 사용해 왔다.²⁾ PBDEs는 비페닐기의 수소를 브롬으로 치환하여 합성한 화합물로 브롬 원자의 위치와 수에 따라 209개의 동질체(congener)와 10개의 동족체(homologue)가 존재한다.³⁾



유엔환경계획(United Nations Environment Programme, UNEP)에서는 2009년 제4차 스톡홀름 협약을 통해 Tetra, Penta, Hexa, HeptaBDE (Bromodiphenyl ether)를 잔류성유기오염물질(persistent organic pollutants, POPs)로 채택하였으며, DecaBDE는 탈브롬화(debromination) 과정을 통해 저분자의 PBDEs로 전환될 수 있어 POPs 후보 물질로 제안하였다.⁴⁾ 이에 따라 협약 당국들은 이러한 물질에 대한 생산과 사용을 금지해야 할 의무가 있으며, 우리나라는 2007년에 잔류성유기오염물질 관리법을 제정하여 PBDEs를 잔류성유기오염물질로 관리하고 있다.⁵⁾

PBDEs는 환경 내 잔류성과 장거리 이동성,²⁾ 생물축적·농축성이 높으며,⁶⁾ 사람에서 갑상선 기능 이상,^{7,8)} 여성의 생식능력 저하⁹⁾ 등과 같은 내분비계 장애를 일으킬 수 있다고 보고하였다. 대기 중으로의 PBDEs 배출원은 제조업 산업시설과 폐기물 처리시설 등이 대표적이며,^{3,10)} 환경에 배출된 PBDEs는 먹이사슬을 통한 생물축적과 농축으로 인체와 생태계에 영향을 미치게 된다.^{6,11)}

현재까지 국내에서 보고한 PBDEs 노출에 관한 연구는 주로 산모의 혈청과 모유 중 PBDEs 농도와 이에 따른 태아와 영유아의 건강 영향에 관한 연구이었다.¹²⁻¹⁴⁾ 그리고 일부 연구에서는 일반도시 지역과 산업단지 주변 지역 성인의 PBDEs 노출 실태와 노출에 영향을 미치는 요인을 조사하였다.^{15,16)} 그러나 폐기물 소각장 운영으로 인한 주변 주거지역 주민들의 PBDEs 노출 실태에 관한 조사는 부족한 실정이다.¹⁷⁾ 폐기물 소각장에서 소각하는 폐기물에는 제조 과정에서 PBDEs를 비롯하여 난연제를 포함하고 있을 가능성이 높다. 따라서 폐기물 소각장 주변 지역에 거주하는 주민들의 PBDEs 노출 실태를 조사하는 것은 사람의 노출을 줄이고 주민건강관리를 위한 대책 수립에 필요한 기초자료를 제공할 수 있다. 이 연구는 폐기물 소각장 주변 지역(노출지역)과 일반도시지역(대조지역)에 거주하는 주민(40대에서 60대 여성)을 대상으로 혈청 중 PBDEs 농도를 비교하였으며, PBDEs 노출에 영향을 미치는 요인을 평가하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

1. 조사 대상

폐기물신설축진법(폐기물처리시설 설치축진 및 주변지역지원 등에 관한 법률)에 따라 주변영향지역은 폐기물처리시설의 부지 경계선으로부터 300 m 이내로 정하고 있다. 그러나 이 연구에서는 주민과 지자체의 협이에 따라 폐기물 소각장으로부터 500 m 이내 지역을 부지 경계선으로 정하고 있어 해당 지역을 노출 지역으로 선정하였다. 대조지역은 폐기물 소각장과 약 8.6 km 떨어진 일반도시지역이며, 입지 조건과 주민들의 성별, 연령 등의 인구분포가 폐기물 소각장 주변 지역과 유사한 지역

을 선정하였다. 연구 대상자는 거주지역의 환경적 영향을 반영하기 위하여 각 해당 지역에서 머무르는 시간이 가장 긴 40대, 50대, 60대 여성(주부)을 선정하였으며, 지역별로 각각 98명씩 총 196명이었다.

2. 설문조사

설문조사는 혈청 중 PBDEs 농도에 영향을 미칠 수 있는 요인들을 평가하기 위하여 수행하였으며, 연구 대상자들의 거주지역과 거주 기간, 나이, 과거 음주와 흡연 경험, 현재 음주와 흡연상태, 현재 폐경 여부, 출산 자녀 수 등을 조사하였다.

3. 건강검진

건강검진은 PBDEs 노출로 인한 개인의 건강 영향을 평가하기 위하여 수행하였다. 건강검진 항목은 선행연구 결과를 참고하여^{18,19)} 체질량 지수(body mass index, BMI), 갑상선 자극 호르몬(thyroid stimulating hormone, TSH), 유리 티록신(free thyroxine, Free T4), 총콜레스테롤(total cholesterol, TC), 트라이글리세라이드(triglyceride, TG) 등이었다. 이 중 총콜레스테롤과 트라이글리세라이드는 혈청 중 PBDEs 농도(pg/L)를 혈청 중 총 지질량(total lipid, TL)에 대한 농도(ng/g lipid)로 보정하기 위해 검사를 수행하였다.

4. 혈청 중 PBDEs 분석

혈청 중 PBDEs 분석은 한국산업기술원의 인체 유래물 활용 노출 생체지표 분석 고도화 기술개발 중 GC-MS/MS를 이용한 혈청 중 잔류성유기오염물질 정량 분석법을 적용하였다.²⁰⁾

4.1. 시료 채취와 전처리

PBDEs 분석을 위한 혈청 시료는 건강검진 시 혈청분리튜브(8 mL CAT Serum Sep Clot Activator, 455211KR, in Austria)를 이용하여 채취한 후 혈청을 분리하여 아이스박스에서 4°C 이하 냉장 상태로 운반하였고, 분석 전까지 초저온냉동고에서 -70°C 이하로 보관하였다.

혈청 200 µL를 15 mL 폴리프로필렌 튜브(Polypropylene tube, Falcon, USA)에 넣은 후 내부표준물질(¹³C¹²-PBDE, EO-5100, Cambridge isotope laboratories, USA) 10 µL와 추출 용매(Ethyl acetate:Hexane:Acetone, 1:1:2 (v/v), J.T Baker, USA, Wako, Japan) 1 mL, 황산마그네슘(Magnesium Sulfate, MgSO₄, Sigma aldrich, USA) 200 mg, 염화나트륨(Sodium Chloride, NaCl, Sigma aldrich, USA) 50 mg을 첨가하여 1분간 진탕기(Vortexer)로 혼합하였다. 혼합한 시료는 원심분리를 이용하여 3,200 g에서 5분간 원심분리한 후 상층액을 새 튜브에 옮겼다. 상층액을 담은 튜브에 추출 용매(Ethyl acetate:Hexane:Acetone, 1:1:2) 1 mL를 첨가한 후 혼합하고, 다시 상층액을 분리하였다. 분리한 상층액에 2차례에 걸쳐 아민

(Primary Secondary Amine, PSA, Agilent technologies, USA) 100 mg을 첨가한 후 혼합하고, 상층액을 다시 분리하는 과정을 반복하였다. 분리한 상층액은 질소 농축기를 이용하여 40°C, 6 psi에서 7분간 증발, 건조한 후 아이소옥테인(Iso-octane, C8H18) 40 µL에 녹인 후 분석에 사용하였다.

4.2. 시료 분석

분석 대상 물질은 PBDEs 중 22종의 동질체이었다. 분석 기기는 기체크로마토그래피와 질량분석기(GC-MS)를 사용하였으며, 기체크로마토그래피는 Agilent 7890B Gas Chromatography (Agilent, USA), 질량분석기는 Xevo TQ-XS Triple-quadrupole Mass Spectrometer (Waters, USA)이었다. 분석 조건은 아래 Table 1에 나타내었다.

4.3. 지질량 보정

혈청 중 PBDEs 농도는 혈중 지질 농도에 따라 달라질 수 있으므로 개인별 혈중 지질 농도의 차이를 보정하여 혈청 중 PBDEs 농도를 표준화하였다. 총 지질량은 건강검진 항목 중 총 콜레스테롤과 트라이글리세라이드 농도를 아래 수식에 대입하여 산출하였다.²¹⁾

$$TL=2.27 \times TC+TG+62.3$$

4.4. 정도관리

표준물질(EO-5405, Cambridge isotope laboratories, USA) 과 내부표준물질(¹³C¹²-PBDE, EO-5100, Cambridge isotope laboratories, USA)을 사용하여 정도관리(QC/QA)를 수행하였다. 정도관리는 방법검출한계(Method detection limit, MDL)와 표준물질 검정곡선의 직선성, 정확도, 정밀도를 평가하였다. 방법검출한계는 표준용액 중 최저농도 수준의 표준물질을 첨가한 시료 7개를 분석한 결과의 표준편차에 3.14를 곱하여 산출하였다. 검량선은 표준원액을 농도에 따라 5개 농도의 표준용액을 제조, 분석한 후 결정계수(R²)가 0.99 이상 되도록 하였다. 정도관리에 관한 결과는 Table 2에 나타내었다.

5. 통계분석

노출지역과 대조지역 연구 대상자의 거주 기간, 연령, 음주, 흡연, 폐경, 출산 자녀 수, 체질량 지수, 갑상선 자극 호르몬, 유리 티록신 등에 대한 대상자의 수와 비율을 산출하였으며, 요인별 노출지역과 대조지역 간의 분포 차이를 확인하기 위하여 카이제곱 검정을 수행하였다. 체질량 지수는 저체중(18.5 미만), 정상(25 미만), 비만(25 이상)으로 구분하였으며, 갑상선 자극 호르몬과 유리 티록신의 정상범위는 각각 0.27 mIU/L 이상 4.20 mIU/L 이하, 0.93 ng/dL 이상 1.71 ng/dL 이하로 하였다.

PBDEs 농도는 노출지역과 대조지역 모두 검출 빈도가

Table 1. GC-MS/MS conditions for PBDEs analysis

Instrument	Conditions
Gas chromatography (Agilent 7890B)	Agilent DB-5MS (30 m×0.250 mm×0.25 µm) Injection temperature: 300°C Injection volume: 2 µL Injection mode: splitless mode Flow rate: 1.0 mL/min (He) Initial temperature: 90°C, hold 1 min Rate 1: 50°C/min Final temperature 1: 180°C, hold 1 min Rate 2: 6°C/min Final temperature 2: 320°C, hold 5 min Run time: 32 min
Mass spectrometry (Xevo TQ-XS)	Ion source: dry condition Transfer line temperature: 300°C N2 make-up gas: 350 mL/min Corona pin current: 2.0 µA Source temperature: 300°C Auxiliary gas flow: 300 mL/min Con gas flow: 265 mL/min Acquisition mode: multiple reaction monitoring

Table 2. The result of MDL and calibration curve for PBDEs analysis in serum

PBDEs	MDL* (ng/mL)	Range (ug/L)	y=ax+b	R ²	Recovery (%)	CV (%)
BDE-3	0.443	0.10~50.0	y=1.57x-0.85	0.99	99.6	7.0
BDE-7	0.448	0.10~50.0	y=6.47x-0.13	0.99	102.9	8.3
BDE-15	0.509	0.10~50.0	y=2.53x-0.67	0.99	100.8	4.5
BDE-17	0.877	0.10~50.0	y=3.57x+0.68	0.99	105.7	6.6
BDE-28	0.831	0.10~50.0	y=3.01x+0.37	0.99	103.2	4.5
BDE-47	0.641	0.10~50.0	y=1.29x+0.07	0.99	103.1	9.4
BDE-66	0.865	0.10~50.0	y=1.45x-0.36	0.99	105.3	4.9
BDE-71	1.060	0.10~50.0	y=1.46x+0.10	0.99	107.8	5.7
BDE-77	1.216	0.10~50.0	y=0.57x-0.54	0.99	97.1	9.7
BDE-85	1.731	0.10~50.0	y=0.88x-0.01	0.99	93.4	6.5
BDE-99	0.947	0.12~60.0	y=1.22x+0.10	0.99	101.0	10.8
BDE-100	1.043	0.10~50.0	y=1.48x-0.20	0.99	103.0	8.0
BDE-119	0.938	0.10~50.0	y=1.53x-0.14	0.99	98.4	7.7
BDE-126	1.171	0.10~50.0	y=0.47x+0.02	0.99	104.9	8.1
BDE-138	2.042	0.20~100.0	y=1.06x-0.23	0.99	97.5	7.1
BDE-153	1.900	0.20~100.0	y=0.82x+0.14	0.99	100.6	9.2
BDE-154	1.789	0.20~100.0	y=1.63x-0.44	0.99	95.4	8.0
BDE-155	1.601	0.20~100.0	y=1.19x-0.00	0.99	96.2	4.7
BDE-166	2.605	0.20~100.0	y=0.99x-0.31	0.99	93.6	5.3
BDE-181	1.785	0.20~100.0	y=0.17x+0.11	0.99	104.1	4.5
BDE-183	2.033	0.20~100.0	y=0.28x+0.27	0.99	101.5	5.1
BDE-190	1.204	0.20~100.0	y=0.14x-0.11	0.99	109.9	3.5

*Method Detection Limit.

50% 이상인 PBDEs 8종(BDE-3, BDE-7, BDE-15, BDE-28, BDE-47, BDE-66, BDE-77, BDE-99) 각각의 농도와 이들 8종을 합한 농도(Σ 8PBDEs), 그리고 22종 전체를 합한 농도(Σ 22PBDEs)로 나타내었다. 검출한계 이하의 농도는 방법검출한계를 2의 제곱근으로 나눈 값을 적용하였다.

연구 대상자의 특성에 따른 혈청 중 PBDEs 농도 차이를 비교하기 위하여 Mann-Whitney U Test와 Kruskal-Wallis Test를 수행하였다.

PBDEs 노출에 영향을 미치는 요인을 분석하기 위하여 다중회귀분석을 수행하였다. 혈청 중 PBDEs 농도를 종속변수로 하였으며, 독립변수는 거주지역과 거주 기간, 연령, 음주, 흡연, 폐경, 출산 자녀 수, 체질량 지수로 하였다.

PBDEs 노출이 혈청 중 갑상선 호르몬에 미치는 영향을 평가하기 위하여 다중회귀분석을 수행하였다. 혈청 중 갑상선 자극 호르몬 농도를 종속변수로 하였으며, 독립변수는 혈청 중 PBDEs 농도로 하였다. 그리고 거주지역과 거주 기간, 연령, 음주, 흡연, 폐경, 출산 자녀 수, 체질량 지수를 독립변수와 함께 공변량 요인으로 포함하였다. 다중회귀분석 시 혈청 중 PBDEs 농도와 갑상선 자극 호르몬 농도는 자연로그로 변환하여 수행

하였다. 통계분석은 SAS (Statistical Analysis Software, Version 9.4, SAS Institute, Cary, NC, USA)를 사용하였다.

6. 기관생명윤리위원회

연구의 윤리적, 과학적 타당성을 검토하고, 연구 대상자들의 안전과 권리를 보호하기 위하여 보건복지부 생명윤리 및 안전에 관한 법률 제10조의 규정에 따라 부산백병원의 기관생명윤리위원회의(Institutional Review Board, IRB) 승인을 받았다(기관 IRB 승인번호: BPIRB 2020-01-009-012). 연구 대상자들은 건강검진을 위한 혈액 시료 채취 시 모든 대상자에게 연구의 내용에 관해 설명하였고, 동의를 받았다.

III. 결 과

1. 연구 대상자들의 인구학적 특성

연구 대상자들의 인구학적 특성을 Table 3에 나타내었다. 연구 대상자는 총 196명이었으며, 40대, 50대, 60대가 각각 89명(45%), 52명(27%), 55명(28%)으로 40대가 가장 많았다. 그리고 거주지역에 따른 연령은 유의한 차이가 없었다($p=0.738$).

Table 3. The characteristics of participants in this study, n (%)

Factor		Total area (n=196)	Exposure area (n=98)	Control area (n=98)	p [¶]
Age	40~49	89 (45)	42 (44)	47 (48)	0.738 ^{¶¶}
	50~59	52 (27)	28 (28)	24 (24)	
	60~69	55 (28)	28 (28)	27 (28)	
Residence periods	<5 years	18 (9)	13 (13)	5 (5)	0.022 ^{¶¶}
	5~10 years	36 (18)	15 (15)	21 (21)	
	10~15 years	52 (27)	31 (32)	21 (21)	
	15~20 years	50 (26)	26 (27)	24 (25)	
	≥20 years	40 (20)	13 (13)	27 (28)	
Drink	No	86 (44)	43 (44)	43 (44)	0.541 ^{¶¶}
	Past	27 (14)	11 (11)	16 (16)	
	Current	83 (42)	44 (45)	39 (40)	
Smoke	No	15 (78)	77 (79)	76 (78)	0.182 ^{¶¶}
	Past	40 (20)	18 (18)	22 (22)	
	Current	3 (2)	3 (3)	0 (0)	
Menopause	No	10 (53)	48 (49)	55 (56)	0.317 ^{¶¶}
	Yes	93 (47)	50 (51)	43 (44)	
Parity [*]	0	8 (4)	6 (6)	2 (2)	0.523 ^{¶¶}
	1	38 (20)	18 (19)	20 (21)	
	2	12 (62)	61 (62)	61 (62)	
	3	28 (14)	13 (13)	15 (15)	
BMI [†]	Under weight	7 (4)	5 (5)	2 (2)	0.193 ^{¶¶}
	Normal weight	12 (66)	59 (60)	70 (71)	
	Obesity	60 (30)	34 (35)	26 (27)	
TSH [‡]	Normal	16 (86)	86 (88)	82 (84)	0.414 ^{¶¶}
	Abnormal	28 (14)	12 (12)	16 (16)	
Free T4 [§]	Normal	19 (98)	98 (100)	94 (96)	0.043 ^{¶¶}
	Abnormal	4 (2)	0 (0)	4 (4)	

*The number of children born.

†Body Mass Index (Under weight: <18.5, Normal weight: <25.0, Obesity: ≥25).

‡Thyroid Stimulating Hormone (Normal: ≥0.27, ≤4.20 mIU/L).

§Free Thyroxine (Normal: ≥ 0.93, ≤1.71 ng/dL).

¶Probability value.

¶¶Chi-squared test by exposure and control area.

설문조사 결과 중 거주 기간은 노출지역에서 10년 이상 15년 미만 거주한 대상자가 31명(32%)으로 가장 많았으며, 대조지역은 20년 이상 거주한 대상자가 27명(28%)으로 가장 많았다. 그리고 거주지역에 따른 거주 기간은 유의한 차이를 보였다(p=0.022). 과거 음주 경험이 있다고 응답한 대상자는 노출지역과 대조지역이 각각 11명(11%), 16명(16%)으로 대조지역이 노출지역보다 많았으며, 현재 음주를 하고 있다고 응답한 대상자는 노출지역과 대조지역이 각각 44명(45%), 39명(40%)으로 노출지역이 대조지역보다 많았다. 그리고 거주지역에 따른 음주는 유의한 차이가 없었다(p=0.541). 과거 흡연 경험이 있다

고 응답한 대상자는 노출지역과 대조지역이 각각 18명(18%), 22명(22%)으로 대조지역이 노출지역보다 많았으며, 현재 흡연을 하고 있다고 응답한 대상자는 총 3명(3%)으로 모두 노출지역에 거주하였다. 그리고 거주지역에 따른 흡연은 유의한 차이가 없었다(p=0.182). 현재 폐경이라고 응답한 대상자는 노출지역과 대조지역이 각각 50명(51%), 43명(44%)으로 노출지역이 대조지역보다 많았으며, 거주지역에 따른 폐경은 유의한 차이가 없었다(p=0.317). 출산 자녀 수는 노출지역과 대조지역 모두 “2명”이라고 응답한 대상자가 가장 많았으며, 노출지역과 대조지역에서 각각 61명(62%)으로 같았다. 그리고 거주지역에 따른

출산 자녀 수는 유의한 차이가 없었다($p=0.523$).

건강검진 결과 중 체질량 지수가 정상인 대상자는 노출지역과 대조지역이 각각 59명(60%), 70명(71%)으로 노출지역보다 대조지역이 많았으며, 거주지역에 따른 체질량 지수는 유의한 차이가 없었다($p=0.193$). 혈청 중 지질량의 범위는 노출지역과 대조지역이 각각 437.9~952.0, 427.5~910.8 mg/dL이었으며,

평균과 표준편차는 각각 656.6 ± 108.6 , 638.5 ± 105.6 mg/dL이었다. 갑상선 자극 호르몬 농도가 비정상인 대상자는 노출지역과 대조지역이 각각 12명(12%), 16명(16%)으로 노출지역보다 대조지역이 많았으며, 거주지역에 따른 갑상선 자극 호르몬 농도는 유의한 차이가 없었다($p=0.414$). 유리 티록신 농도가 비정상인 대상자는 총 4명(2%)으로 모두 대조지역에 거주하였

Table 4. Geometric mean serum PBDEs concentration by characteristics of participants (ng/g lipid)

Factor		BDE-3	BDE-7	BDE-15	BDE-28	BDE-47	BDE-66	BDE-77	BDE-99	$\Sigma 8$ PBDEs ^{††}	$\Sigma 22$ PBDEs ^{††}
Detect, n (%)		196 (100)	174 (89)	185 (94)	185 (94)	188 (96)	145 (74)	109 (56)	166 (85)	-	-
Area	Control	5.590 [†]	0.151 [†]	0.394 [†]	0.418	0.376	0.170 [†]	0.241	0.234 [†]	8.174 [†]	11.728 [†]
	Exposure	11.542 [†]	0.407 [†]	0.859 [†]	0.462	0.319	0.290 [†]	0.217	0.327 [†]	15.847 [†]	21.585 [†]
Age	40~49	6.938*	0.219	0.547	0.418	0.320	0.212	0.240	0.251*	10.074*	13.957 [†]
	50~59	8.971*	0.247	0.549	0.483	0.342	0.221	0.210	0.267*	12.478*	17.271 [†]
	60~69	9.171*	0.304	0.677	0.436	0.399	0.241	0.230	0.334*	12.692*	18.192 [†]
Residence periods	<5 years	13.014	0.268	0.461	0.372	0.319	0.180	0.205	0.209	16.232	21.758
	5~10 years	6.876	0.235	0.508	0.375	0.330	0.255	0.232	0.293	9.826	14.197
	10~15 years	7.683	0.271	0.671	0.493	0.351	0.226	0.219	0.279	11.519	15.816
	15~20 years	7.799	0.222	0.566	0.469	0.334	0.215	0.224	0.275	10.903	15.364
Drink	≥20 years	8.183	0.257	0.626	0.435	0.389	0.220	0.257	0.296	11.496	16.119
	No	8.183	0.249	0.530	0.444	0.340	0.197	0.218	0.282	11.416	16.055
	Past	7.553	0.285	0.657	0.414	0.394	0.233	0.282	0.299	11.473	15.721
	Current	8.037	0.236	0.615	0.444	0.339	0.248	0.224	0.263	11.314	15.816
Smoke	No	7.791	0.243	0.580	0.454	0.342	0.218	0.226	0.276	11.123	15.565*
	Past	8.339	0.249	0.560	0.376	0.354	0.233	0.236	0.269	11.588	16.216*
	Current	23.524	0.694	1.063	0.622	0.516	0.297	0.296	0.437	28.503	37.713*
Menopause	No	7.008 [†]	0.221*	0.528	0.439	0.318	0.217	0.240	0.246 [†]	10.176 [†]	14.182 [†]
	Yes	9.337 [†]	0.282*	0.647	0.440	0.382	0.228	0.217	0.314 [†]	12.884 [†]	18.065 [†]
Parity [§]	0	7.606	0.296	0.425	0.423	0.338	0.240	0.170	0.319	10.957	15.737
	1	7.714	0.251	0.627	0.433	0.412	0.219	0.267	0.273	11.404	15.959
	2	8.174	0.237	0.579	0.432	0.341	0.215	0.227	0.278	11.427	15.879
	3	8.004	0.282	0.584	0.490	0.298	0.257	0.209	0.263	11.268	16.055
BMI	Under weight	8.891	0.281	0.477	0.403	0.358	0.329	0.309	0.319	12.219	17.064
	Normal weight	8.142	0.237	0.555	0.446	0.335	0.220	0.234	0.263	11.325	15.784
	Obesity	7.714	0.268	0.658	0.430	0.372	0.217	0.210	0.302	11.393	16.039
TSH [¶]	Normal	8.199	0.253	0.608	0.445	0.340	0.232*	0.227	0.274	11.612	16.297
	Abnormal	7.092	0.218	0.448	0.405	0.389	0.172*	0.238	0.293	10.115	13.791
Free T4 ^{**}	Normal	8.085	0.248	0.585	0.437	0.345	0.222	0.227	0.274	11.416	15.959
	Abnormal	5.772	0.267	0.436	0.544	0.420	0.243	0.318	0.401	9.728	13.915

Denotes statistical significant difference in Mann-Whitney U test or Kruskal-Wallis test (* $p < 0.05$, [†] $p < 0.01$, ^{††} $p < 0.001$).

[§]The number of children born.

^{||}Body Mass Index (Under weight: < 18.5 , Normal weight: < 25.0 , Obesity: ≥ 25).

[¶]Thyroid Stimulating Hormone (Normal: ≥ 0.27 , ≤ 4.20 mIU/L).

^{**}Free Thyroxine (Normal: ≥ 0.93 , ≤ 1.71 ng/dL).

^{††}Sum of (BDE-3, BDE-7, BDE-15, BDE-28, BDE-47, BDE-66, BDE-77, BDE-99).

^{†††}Sum of (BDE-3, BDE-7, BDE-15, BDE-17, BDE-28, BDE-47, BDE-66, BDE-71, BDE-77, BDE-85, BDE-99, BDE-100, BDE-119, BDE-126, BDE-138, BDE-153, BDE-154, BDE-155, BDE-166, BDE-181, BDE-183, BDE-190).

다. 그리고 거주지역에 따른 유리 티록신 농도는 유의한 차이가 있는 것으로 나타났으나(p=0.043), 비정상인 대상자의 수가 적고 모두 대조지역에 거주하여 유의한 차이가 있다고 평가하기 어렵다.

2. 연구 대상자들의 인구학적 특성에 따른 혈청 중 PBDEs

설문조사와 건강검진의 결과를 토대로 연구 대상자의 인구

학적 특성에 따른 혈청 중 PBDEs의 기하평균 농도를 Table 4에 나타내었다.

거주지역에 따른 혈청 중 $\Sigma 8$ PBDEs와 $\Sigma 22$ PBDEs 농도는 노출지역이 각각 15.847, 21.585 ng/g lipid, 대조지역이 각각 8.174, 11.728 ng/g lipid로 노출지역이 대조지역보다 유의하게 높았다(p<0.001). 그리고 각 물질별로는 BDE-3과 BDE-7, BDE-15, BDE-66, BDE-99가 노출지역(11.542, 0.407, 0.859, 0.290, 0.327 ng/g lipid)에서 대조지역(5.590,

Table 5. Result of multiple regression analysis between serum PBDEs concentration and the characteristics of participants

Factor	BDE-3	BDE-7	BDE-15	BDE-28	BDE-47	BDE-66	BDE-77	BDE-99	$\Sigma 8$ PBDEs**	$\Sigma 22$ PBDEs ^{††}	
Area	Control [¶]										
Exposure	0.899 [†]	1.159 [†]	0.955 [†]	0.131	-0.329*	0.890 [†]	-0.056	0.575 [†]	1.045 [†]	1.128 [†]	
Age	40~9 [¶]										
50~59	0.207	0.118	-0.121	0.309	0.049	0.477*	-0.041	-0.070	0.231	0.323	
60~69	0.135	0.270	0.006	0.271	0.185	0.501	0.032	0.113	0.154	0.347	
Residence periods	<5 years [¶]										
5~0 years	-0.612*	0.205	0.319	0.071	0.082	0.775 [†]	0.220	0.875 [†]	-0.537*	-0.524*	
10~15 years	-0.616*	0.208	0.524*	0.455	0.212	0.408	0.079	0.676*	-0.447	-0.490*	
15~20 years	-0.626*	0.004	0.338	0.364	-0.062	0.369	0.094	0.612*	-0.584*	-0.605 [†]	
≥20 years	-0.368	0.298	0.542	0.300	0.120	0.628*	0.496	0.732*	-0.271	-0.319	
Drink	No [¶]										
Past	-0.058	0.230	0.299	-0.027	0.083	0.355	0.351	0.019	0.074	0.023	
Current	0.099	-0.077	0.085	0.044	0.110	0.396*	-0.059	-0.095	0.093	0.117	
Smoke	No [¶]										
Past	0.178	0.069	-0.054	-0.242	-0.026	0.070	0.011	-0.068	0.148	0.168	
Current	1.258*	0.665	0.613	0.557	0.856	0.074	0.944	0.451	1.271*	1.417 [†]	
Menopause	No [¶]										
Yes	0.160	-0.071	0.103	-0.231	0.231	-0.309	-0.339	0.279	0.139	0.098	
Parity [§]	0 [¶]										
1	0.489	0.305	0.851*	0.123	0.424	-0.243	0.984*	-0.150	0.627	0.609	
2	0.589	0.147	0.651	0.088	0.048	-0.310	0.671	-0.209	0.616	0.584	
3	0.531	0.345	0.675	0.322	-0.192	-0.137	0.500	-0.341	0.581	0.580	
BMI	Under weight [¶]										
Normal weight	0.044	0.119	0.493	0.176	-0.185	-0.501	-0.352	-0.293	0.123	0.087	
Obesity	-0.183	0.108	0.592	0.135	0.007	-0.636	-0.536	-0.127	-0.042	-0.064	

Serum PBDEs concentrations were converted to natural log in multiple regression analysis, value of table are standardized regression coefficient.

*p<0.05.

[†]p<0.01.

^{††}p<0.001.

[§]The number of children born.

^{||}Body Mass Index (Under weight: <18.5, Normal weight: <25.0, Obesity: ≥25).

[¶]Reference.

**Sum of (BDE-3, BDE-7, BDE-15, BDE-28, BDE-47, BDE-66, BDE-77, BDE-99).

^{††}Sum of (BDE-3, BDE-7, BDE-15, BDE-17, BDE-28, BDE-47, BDE-66, BDE-71, BDE-77, BDE-85, BDE-99, BDE-100, BDE-119, BDE-126, BDE-138, BDE-153, BDE-154, BDE-155, BDE-166, BDE-181, BDE-183, BDE-190).

0.151, 0.394, 0.170, 0.234 ng/g lipid)보다 유의하게 높았다 ($p < 0.001$).

연령에 따른 혈청 중 $\Sigma 8PBDEs$ 농도는 40대와 50대, 60대가 각각 10.074, 12.478, 12.692 ng/g lipid로 60대가 가장 높았으며, 연령 간 유의한 농도 차이를 나타내었다 ($p < 0.05$). 그리고 $\Sigma 22PBDEs$ 농도도 40대와 50대, 60대가 각각 13.957, 17.271, 18.192 ng/g lipid로 60대가 가장 높았으며, 연령 간 유의한 농도 차이를 나타내었다 ($p < 0.01$). 각 물질별로는 BDE-3과 BDE-99는 40대(6.938, 0.251 ng/g lipid)와 50대(8.971, 0.267 ng/g lipid), 60대(9.171, 0.334 ng/g lipid) 간 유의한 농도 차이를 나타내었다 ($p < 0.05$, $p < 0.05$).

거주 기간에 따른 혈청 중 PBDEs 농도는 증감의 경향이 없었다. 거주 기간에 따른 혈청 중 $\Sigma 8PBDEs$ 농도는 거주 기간이 “5년 미만”, “5년 이상 10년 미만”, “10년 이상 15년 미만”, “15년 이상 20년 미만”, “20년 이상”이 각각 16.232, 9.826, 11.519, 10.903, 11.496 ng/g lipid이었으며, $\Sigma 22PBDEs$ 농도는 각각 21.758, 14.197, 15.816, 15.364, 16.119 ng/g lipid이었다.

음주에 따른 혈청 중 $\Sigma 8PBDEs$ 농도는 “음주를 하지 않음”, “과거 음주 경험이 있음”, “현재 음주를 함”이 각각 11.416, 11.473, 11.314 ng/g lipid이었으며, $\Sigma 22PBDEs$ 농도는 각각 16.055, 15.721, 15.816 ng/g lipid로 음주에 따른 집단 간 농도는 유사하였다.

흡연에 따른 혈청 중 $\Sigma 8PBDEs$ 농도는 “흡연을 하지 않음”, “과거 흡연 경험이 있음”, “현재 흡연을 함”이 각각 11.123,

11.588, 28.503 ng/g lipid이었으며, $\Sigma 22PBDEs$ 농도는 각각 15.565, 16.216, 37.713 ng/g lipid로 집단 간 유의한 농도 차이를 나타내었다 ($p < 0.05$). 그러나 현재 흡연을 하는 대상자의 수가 적어 유의한 농도 차이가 있다고 평가하기 어렵다.

폐경 여부에 따른 혈청 중 $\Sigma 8PBDEs$ 와 $\Sigma 22PBDEs$ 농도는 현재 폐경인 대상자는 각각 12.884, 18.065 ng/g lipid, 현재 폐경이 아닌 대상자가 각각 10.176, 14.182 ng/g lipid로 현재 폐경인 대상자가 유의하게 높았다 ($p < 0.01$, $p < 0.001$). 그리고 각 물질별로는 BDE-3과 BDE-7, BDE-99이 현재 폐경인 대상자(9.337, 0.282, 0.314 ng/g lipid)에서 현재 폐경이 아닌 대상자(7.008, 0.221, 0.246 ng/g lipid)보다 유의하게 높았다 ($p < 0.01$, $p < 0.05$, $p < 0.01$).

출산 자녀 수에 따른 혈청 중 PBDEs 농도는 증감의 경향이 없었다. 출산 자녀 수에 따른 혈청 중 $\Sigma 8PBDEs$ 농도는 출산 자녀 수가 “0명”, “1명”, “2명”, “3명 이상”이 각각 10.957, 11.404, 11.427, 11.268 ng/g lipid이었으며, $\Sigma 22PBDEs$ 농도는 15.737, 15.959, 15.879, 16.055 ng/g lipid이었다.

체질량 지수에 따른 $\Sigma 8PBDEs$ 농도는 저체중과 정상, 비만인 대상자가 각각 12.219, 11.325, 11.393 ng/g lipid이었으며, $\Sigma 22PBDEs$ 농도는 각각 17.064, 15.784, 16.039 ng/g lipid로 체질량 지수에 따른 집단 간 농도는 유사하였다.

갑상선 자극 호르몬 농도의 정상과 비정상에 따른 혈청 중 $\Sigma 8PBDEs$ 농도는 각각 11.612, 10.115 ng/g lipid로 유사하였다. 그리고 $\Sigma 22PBDEs$ 농도는 각각 16.297, 13.791 ng/g lipid

Table 6. Result of multiple regression analysis between serum PBDEs and thyroid stimulating hormone concentration

PBDEs	B [†]	β [§]	p	R ^{2¶}	p (model) ^{**}
BDE-3	0.076	0.083	0.869	0.175	0.146
BDE-7	0.030	0.037	0.711		
BDE-15	-0.051	-0.062	0.557		
BDE-28	0.076	0.072	0.398		
BDE-47	-0.053	-0.046	0.589		
BDE-66	-0.062	-0.056	0.547		
BDE-77	-0.020	-0.017	0.833		
BDE-99	0.225	0.189	0.037		
$\Sigma 8PBDEs^*$	-0.121	-0.105	0.864		
$\Sigma 22PBDEs^\dagger$	-0.136	-0.099	0.732		

In multiple regression analysis, serum PBDEs and thyroid stimulating hormone concentrations were converted to natural log. Area, age, residence periods, drink, smoke, menopause, parity, BMI variable were included as covariate.

*Sum of (BDE-3, BDE-7, BDE-15, BDE-28, BDE-47, BDE-66, BDE-77, BDE-99).

†Sum of (BDE-3, BDE-7, BDE-15, BDE-17, BDE-28, BDE-47, BDE-66, BDE-71, BDE-77, BDE-85, BDE-99, BDE-100, BDE-119, BDE-126, BDE-138, BDE-153, BDE-154, BDE-155, BDE-166, BDE-181, BDE-183, BDE-190).

‡Unstandardized regression coefficient.

§Standardized regression coefficient.

||Probability value.

¶Coefficient of determination.

**Probability value of regression model.

로 정상인 대상자가 비정상인 대상자보다 높으나, 통계적으로 유의하지 않았다. 각 물질별로는 BDE-66은 비정상인 대상자(0.172 ng/g lipid)가 정상인 대상자(0.232 ng/g lipid)보다 유의하게 낮았다($p < 0.05$).

우리 티록신 농도의 정상과 비정상에 따른 혈청 중 $\Sigma 8$ PBDEs 농도는 각각 11.416, 9.728 ng/g lipid이었으며, $\Sigma 22$ PBDEs 농도는 각각 15.959, 13.915 ng/g lipid로 정상인 대상자가 비정상인 대상자보다 높았다. 그러나 통계적으로 유의하지 않았으며, 비정상인 대상자의 수가 적어 그 의미를 평가하기는 어렵다.

3. 혈청 중 PBDEs 농도에 영향을 미치는 요인

설문조사와 건강검진 항목을 기반으로 혈청 중 PBDEs 농도에 영향을 미치는 요인을 조사하기 위하여 다중회귀분석을 수행하였으며, 그 결과 거주지역만이 유의한 변수로 나타났다(Table 5). 거주지역에 따른 $\Sigma 8$ PBDEs와 $\Sigma 22$ PBDEs 농도는 대조지역을 기준으로 노출지역과 모두 양의 연관성을 나타내었으며($\beta = 1.045$, $\beta = 1.128$), 통계적으로 유의하였다($p < 0.001$). 그리고 각 물질별로는 BDE-3과 BDE-7, BDE-15, BDE-66, BDE-99이 대조지역을 기준으로 노출지역과 모두 양의 연관성을 나타내었으며($\beta = 0.899$, $\beta = 1.159$, $\beta = 0.955$, $\beta = 0.890$, $\beta = 0.575$), 통계적으로 유의하였다($p < 0.001$).

4. 혈청 PBDEs 농도에 따른 갑상선 자극 호르몬 (TSH) 농도

혈청 PBDEs와 갑상선 자극 호르몬 농도 간 다중회귀분석 결과를 아래 Table 6에 나타내었다. 갑상선 자극 호르몬 농도는 $\Sigma 8$ PBDEs, $\Sigma 22$ PBDEs와 모두 음의 연관성을 나타내었으나($\beta = -0.105$, $\beta = -0.099$), 통계적으로 유의하지 않았다($p = 0.864$, $p = 0.732$). 그리고 BDE-3과 BDE-7, BDE-28, BDE-99는 갑상선 자극 호르몬 농도와 양의 연관성을 가지는 것으로 나타났으며($\beta = 0.083$, $\beta = 0.037$, $\beta = 0.072$, $\beta = 0.189$), 이 중 BDE-99만이 통계적으로 유의하였다($p = 0.037$).

IV. 고찰

이 연구의 결과에 의하면 거주지역에 따른 혈청 중 PBDEs 농도는 폐기물 소각장 주변 지역에 거주하는 주민이 일반도시지역에 거주하는 주민보다 높은 것으로 조사되었다. 그리고 다중회귀분석 결과 일반도시지역을 기준으로 폐기물 소각장 주변 지역과 혈청 중 PBDEs 농도는 양의 연관성을 가지는 것으로 나타났다. Liu 등(2016)²²⁾의 연구에 의하면 폐기물 처리시설에 가까이 거주할수록 혈청 중 PBDEs 농도가 높았다. 이러한 연구의 결과와 함께 이 연구의 결과로 보아 폐기물 소각장은 그 주변에 거주하는 주민의 혈청 중 PBDEs 농도에 영향을 미치는 것으로

평가되며, 이는 폐기물 소각으로 인해 발생한 PBDEs가 환경으로 배출된 후 인근 거주지역 주민의 인체에 노출되어 축적될 가능성이 높음을 의미한다.

연령에 따른 혈청 중 PBDEs 농도는 비례하여 증가하는 경향을 보였으나, 다중회귀분석 결과 연령과 혈청 중 PBDEs 농도는 연관성이 없는 것으로 조사되었다. Jeon 등(2021)¹⁵⁾의 연구에 의하면, 혈청 중 PBDEs 농도는 PBDEs의 높은 잔류성과 생물농축성으로 인해 연령이 증가할수록 증가한다고 보고하였다. 그러나 연령과 혈청 중 PBDEs 농도는 상관성이 없다고 보고한 연구도 있어,^{23,24)} 향후 혈청 PBDEs 농도에 영향을 미치는 다양한 요인들을 포함한 연구가 필요하다.

음주 상태에 따른 혈청 중 PBDEs 농도는 모두 유사하였으며, 다중회귀분석 결과 현재 음주 상태와 혈청 중 PBDEs 농도는 연관성이 없는 것으로 조사되었다. Kim 등(2012)¹⁶⁾의 연구에 의하면 대상자의 음주 상태가 혈청 중 PBDEs 노출에 직접적인 영향을 미치는 요인이 아니라고 보고하였다. 그러나 이 연구와 같이 여성을 대상으로 수행한 Min 등(2009)¹⁹⁾의 연구에서는 음주자가 비음주자와 과거 음주 이력이 있는 현재 비음주자보다 혈청 중 PBDEs 농도가 높다고 보고한 바 있어 추가적인 조사가 필요하다.

흡연상태에 따른 혈청 중 PBDEs 농도는 현재 흡연을 하는 대상자가 흡연을 하지 않거나 과거 흡연경험이 있는 대상자보다 높은 것으로 조사되었으나, 다중회귀분석 결과는 연관성이 없는 것으로 조사되었다. Lee 등(2013)²⁵⁾의 연구에 의하면 연구 대상자의 흡연상태는 PBDEs와 같은 잔류성유기오염물질의 체내 농도 수준에 영향을 미칠 수 있는 중요한 요인으로 보고하였으며, Moon 등(2017)²⁶⁾은 흡연자가 비흡연자보다 혈청 중 PBDEs 농도가 높다고 보고하였다. 그리고 Jang 등(2010)¹⁸⁾은 흡연자가 많은 남성이 여성보다 혈청 중 PBDEs 농도 수준이 높다고 보고하였다. 이 연구의 결과도 이러한 이전의 연구 결과와 유사하였으나 참여자 중 현재 흡연을 하는 대상자가 적어(총 3명) 흡연상태에 따른 혈청 중 PBDEs 농도 수준을 평가하는 데 제한점이 있었다.

폐경 여부에 따른 혈청 중 PBDEs 농도는 현재 폐경인 대상자가 현재 폐경이 아닌 대상자보다 높은 것으로 조사되었다. 그러나 다중회귀분석 결과 폐경과 혈청 중 PBDEs 농도는 연관성이 없는 것으로 조사되었다. Kim 등(2022)²⁷⁾의 연구에 의하면 폐경은 혈청 중 PBDEs 농도에 영향을 미칠 수 있으며, Jeon 등(2021)¹⁵⁾은 폐경기 여성의 혈청 중에는 PBDEs와 같은 잔류성유기오염물질의 농도가 높다고 보고하였다. 폐경과 혈청 중 PBDEs 농도에 대한 정확한 메커니즘은 아직 보고되지 않았으나, 폐경기 여성의 혈청 중 PBDEs 농도 수준이 높은 원인은 생체 내 PBDEs가 에스트로겐, 프로게스테론과 같은 스테로이드 호르몬 농도와 연관된다는 보고가 있다.²⁸⁾ 그리고 여성 청소년의 경우 혈청 중 PBDEs 농도 수준이 초경의 시작 나이에도 영

향을 미칠 수 있다는 보고도 있다.²⁹⁾

출산 자녀 수와 혈청 중 PBDEs 농도 간에는 특이한 경향이 없는 것으로 조사되었다. 현재까지 출산 자녀 수와 혈청 중 PBDEs 농도 간 연관성에 관한 연구는 보고되지 않았다. 그러나 산모의 혈청 중 PBDEs 농도가 제대혈과 태아의 혈청 중 PBDEs 농도에 영향을 미칠 수 있다는 보고가 있으며,¹³⁾ 출산 직후 산모의 혈청 중 PBDEs 농도 수준이 일시적으로 낮아진다는 보고도 있다.³⁰⁾ 이러한 연구들로 보아 출산에 따라 혈청 중 PBDEs가 자녀로 전이되어 산모의 혈청 농도 수준이 낮아질 수 있을 것으로 평가된다. 그러나 이 연구의 경우와 같이 마지막 출산 후 본 조사의 시점까지 경과 기간이 불명확한 경우 연령과 폐경 등과 같은 혈청 PBDEs 농도 증감에 영향을 미치는 요인이 복합적으로 관련하여 평가에 제한점으로 작용하였다. 따라서 향후 출산 자녀 수에 따른 혈청 PBDEs 농도에 관한 연구는 반드시 마지막 출산 후 경과 기간, 그리고 폐경 여부와 함께 폐경 후 경과 기간을 반영하여야 할 것이다.

체질량 지수에 따른 혈청 중 PBDEs 농도는 저체중인 대상자가 정상과 비만인 대상자보다 높아 이전의 연구와 상반되는 결과를 나타내었다. 그러나 다중회귀분석 결과 체질량 지수와 혈청 중 PBDEs 농도는 연관성이 없는 것으로 조사되었다. Choi 등(2018)³¹⁾의 연구에 의하면 PBDEs와 같은 잔류성유기오염물질은 인체 내 지방에 축적될 수 있으며, Pumarega 등(2016)³²⁾은 체질량 지수의 증가에 따라 혈청 중 PBDEs 농도 또한 증가한다고 보고하였다. 그러나 다른 연구에서는 체질량 지수는 혈청 중 PBDEs 농도와 상관성이 없다고 보고하였다.¹⁶⁾

기술통계 분석 결과에서 혈청 중 PBDEs 농도는 갑상선 자극 호르몬 농도가 비정상인 대상자가 정상인 대상자보다 낮았으나 다중회귀분석 결과 혈청 중 PBDEs 농도와 갑상선 자극 호르몬 농도와는 연관성이 없었다. 그리고 노출지역과 대조지역에 따른 혈청 PBDEs와 갑상선 자극 호르몬 농도 간 다중회귀분석 결과 모두 통계적으로 유의미한 연관성이 없었다. Makey 등(2016)³³⁾의 연구에 의하면 혈청 중 PBDEs 농도는 갑상선 자극 호르몬 농도와 양의 연관성을 가지는 것으로 보고하였다. 그러나 Chevrier 등(2010)³⁴⁾은 혈청 중 PBDEs 농도는 갑상선 자극 호르몬 농도와 음의 연관성을 가지는 것으로 보고하였다. 그리고 Kim 등(2013)³⁵⁾의 연구에서는 혈청 중 PBDEs 농도와 갑상선 자극 호르몬 농도 간 연관성이 없다고 보고하여, 연구에 따라 서로 다른 결과를 나타내었다. 이 연구에서는 혈청 중 갑상선 자극 호르몬 농도만을 고려하였으며, 향후 연구에서는 연구 대상자의 갑상선 질환에 관한 의사의 진단과 치료 여부도 결과 분석에 반영하여야 할 것이다.

이 연구는 혈청 중 PBDEs 농도에 영향을 미칠 수 있는 요인을 평가하기 위하여 설문조사와 건강검진을 통해 조사된 요인들 간 다중회귀분석을 수행하였으며, 그 결과 거주지역만이 유의하였다. 국내 연구에서 산업단지와 일반도시지역 인근 거주

지역의 실내(집) 먼지에 PBDEs가 포함되어 있다고 보고하였으며,³⁶⁾ 실내에 침적된 바닥 먼지에도 PBDEs가 검출된다고 보고하였다.³⁷⁾ 국외 연구에서도 실내와 실외에 분포하는 먼지 중 PBDEs가 혈청 중 PBDEs 농도 수준에 영향을 미치는 것으로 보고하였다.³⁸⁾ Stapleton 등(2012)³⁹⁾은 미국인 83명을 대상으로 실내(집) 먼지 농도와 먼지 중 PBDEs, 혈청 중 PBDEs 농도 간 연관성이 존재한다고 보고하였다. 향후 연구에서는 폐기물 소각장 주변 지역과 일반도시지역에서 거주하는 주민의 혈청 중 PBDEs 농도에 영향을 미칠 수 있는 요인을 평가하기 위해서는 이 조사와 같은 설문조사와 건강검진, 그리고 바이오모니터링과 함께 대상 지역의 대기와 실내 환경 중 PBDEs에 관한 조사를 병행해야 할 것이다.

PBDEs 중 BDE-47은 저농도에서도 인체 위해성을 유발할 수 있으며,⁴⁰⁾ 일부 연구에서는 BDE-47이 PBDEs의 인체 노출에 대한 생물지표로 보고하였다.¹²⁾ 그리고 Kim 등(2012)¹⁶⁾의 연구에 의하면 우리나라 인구의 혈청 중 PBDEs에서 BDE-47의 농도가 높다고 보고하였다. 그러나 이 연구에서 BDE-47의 농도는 낮은 수준으로 조사되었으며, 두 조사지역 간 농도도 유사하였다. 그리고 다중회귀분석 결과 BDE-47의 농도에 영향을 미치는 유의한 변수는 없었으며, 갑상선 자극 호르몬 농도와도 유의미한 연관성이 없는 것으로 나타났다. 혈청 중 BDE-47 농도와 갑상선 자극 호르몬 농도 간 연관성은 기존 수행한 연구들에서 상이한 결과를 나타내었다. 미국의 일반도시지역에서 임산부 270명을 대상으로 수행한 Chevrier 등(2010)³⁴⁾의 연구와 영유아 80명을 대상으로 수행한 Jacobson 등(2016)⁴¹⁾의 연구는 혈청 중 BDE-47 농도는 갑상선 자극 호르몬 농도와 연관이 있는 것으로 보고하였다. 그러나 중국의 일반도시지역에서 혈청 갑상선 호르몬 농도 비정상자를 대상으로 수행한 Yang 등(2021)⁴²⁾의 연구는 혈청 중 BDE-47 농도와 갑상선 자극 호르몬 농도 간 연관성이 없는 것으로 보고하였으며, 소각장 주변 지역과 일반도시지역의 주부들을 대상으로 수행한 이 연구의 결과도 Yang 등(2021)⁴²⁾의 결과와 유사하였다. 이러한 결과로 보아 혈청 PBDEs 농도와 이에 따른 갑상선 자극 호르몬에 대한 영향은 연구 지역과 대상에 따라 상이한 결과를 나타내며, 향후 이 분야에 대한 추가 연구가 필요하다.

이 연구에서는 연구 대상자의 식습관에 관한 자료를 반영하지 못한 제한점이 있다. 일반적으로 PBDEs와 같은 잔류성유기오염물질의 인체 노출에는 식품 섭취가 중요한 경로로 작용한다.³¹⁾ 그리고 PBDEs의 주된 노출원이 되는 식품은 어패류와 육류 등이며,⁴³⁾ 우리나라의 경우 어패류의 노출 기여도가 높다는 보고가 있다.¹⁸⁾ 따라서 향후 조사에서는 대상자들의 식습관에 대한 조사를 병행할 필요가 있다.

V. 결 론

이 연구는 폐기물 소각장 주변 지역과 일반도시지역에서 거주하는 주민을 대상으로 혈청 중 PBDEs 농도를 분석하고 노출에 영향을 미치는 요인, 그리고 노출에 따른 건강 영향을 평가하고자 하였다. 이를 위해 폐기물 소각장 주변 지역과 일반도시지역에서 거주하는 주민의 혈청에서 22종의 PBDEs 농도를 분석하였으며, 설문조사와 건강검진을 수행하였다. 설문조사에서는 연구 대상자의 거주지역과 거주 기간, 연령, 음주와 흡연상태, 폐경 여부, 출산 후 자녀 수 등을 조사하였으며, 건강검진에서는 체질량 지수와 혈청 중 갑상선 자극 호르몬, 유리 티록신 농도이었다.

연구 대상자는 각 해당 지역에 거주하는 40대, 50대, 60대 여성이었으며, 거주지역별 98명으로 총 196명이었다. 연구 대상자의 인구학적 특성에 따른 혈청 중 PBDEs 농도는 거주지역과 연령, 흡연, 폐경 여부에 따라 유의한 농도 차이를 보였다. PBDEs 노출에 영향을 미치는 요인을 평가하기 위하여 다중회귀분석을 수행하였으며, 그 결과 거주지역만이 혈청 중 PBDEs 농도에 영향을 미치는 요인으로 평가되었으며, 그 외 변수들은 연관이 없었다. PBDEs 노출이 혈청 중 갑상선 자극 호르몬 (TSH) 농도에 미치는 영향을 평가하기 위하여 다중회귀분석을 수행한 결과 연관이 없는 것으로 평가되었다.

향후 소각장 주변에 거주하는 주민들의 혈청 중 PBDEs에 영향을 미치는 요인을 평가하기 위해서는 폐기물 소각장 주변의 대기와 수질, 토양 등의 환경 매체 내 PBDEs 농도 수준과 함께 식습관에 대한 조사를 포함한 모니터링이 필요하다.

Conflict of Interest

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

References

1. United Nations Environment Programme. Global Chemicals outlook II: from legacies to innovative solutions. Available: <https://www.unep.org/resources/report/global-chemicals-outlook-ii-legacies-innovative-solutions> [accessed 21 June 2024].
2. Earnshaw MR, Jones KC, Sweetman AJ. Estimating European historical production, consumption and atmospheric emissions of decabromodiphenyl ether. *Sci Total Environ.* 2013; 447: 133-142.
3. Korea Institute of Science and Technology Information (KISTI). Flame Retardant. Seoul; KISTI; 2002 Dec. Report No.: TRKO201000015663.
4. United Nations Environment Programme. Guidance for the inventory of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) listed under the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants. Available:

<https://chm.pops.int/Implementation/NIPs/Guidance/Guidance-fortheinventoryofPBDEs/tabid/3171/Default.aspx> [accessed 21 June 2024].

5. Ministry of Environment. Guidelines for the control of residual organic pollutants (2013). Available: https://www.me.go.kr/home/web/policy_data/read.do?menuId=10276&seq=4990 [accessed 21 June 2024].
6. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Toxicological profile for polybrominated diphebyl ethers (PBDEs). Available: <https://www.n.cdc.gov/TSP/ToxProfiles/ToxProfiles.aspx?id=901&tid=183> [accessed 21 June 2024].
7. Byrne SC, Miller P, Seguinot-Medina S, Waghiyi V, Buck CL, von Hippel FA, et al. Associations between serum polybrominated diphenyl ethers and thyroid hormones in a cross sectional study of a remote Alaska Native population. *Sci Rep.* 2018; 8(1): 2198.
8. Ruis MT, Rock KD, Hall SM, Horman B, Patisaul HB, Stapleton HM. PBDEs concentrate in the fetal portion of the placenta: implications for thyroid hormone dysregulation. *Endocrinology.* 2019; 160(11): 2748-2758.
9. Harley KG, Marks AR, Chevrier J, Bradman A, Sjödin A, Eskenazi B. PBDE concentrations in women's serum and fecundability. *Environ Health Perspect.* 2010; 118(5): 699-704.
10. United States Environmental Protection Agency. Fact sheet: assessing risks from flame retardants. Available: <https://www.epa.gov/assessing-and-managing-chemicals-under-tsca/fact-sheet-assessing-risks-flame-retardants> [accessed 21 June 2024].
11. Linares V, Bellés M, Domingo JL. Human exposure to PBDE and critical evaluation of health hazards. *Arch Toxicol.* 2015; 89(3): 335-356.
12. We SU, Yoon CH, Min BY. Concentrations of PBDE congeners in breast milk and predictors of exposure in Seoul residents. *J Environ Health Sci.* 2011; 37(6): 440-449.
13. Choi G, Kim S, Kim S, Kim S, Choi Y, Kim HJ, et al. Occurrences of major polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in maternal and fetal cord blood sera in Korea. *Sci Total Environ.* 2014; 491-492: 219-226.
14. Kang CS, Lee JH, Kim SK, Lee KT, Lee JS, Park PS, et al. Polybrominated diphenyl ethers and synthetic musks in umbilical cord serum, maternal serum, and breast milk from Seoul, South Korea. *Chemosphere.* 2010; 80(2): 116-122.
15. Jeon HL, Hong S, Choi K, Lee C, Yoo J. First nationwide exposure profile of major persistent organic pollutants among Korean adults and their determinants: Korean National Environmental Health Survey Cycle 3 (2015-2017). *Int J Hyg Environ Health.* 2021; 236: 113779.
16. Kim J, Kang JH, Park H, Baek SY, Kim YH, Chang YS. Assessment of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in serum from the Korean general population. *Environ Pollut.* 2012; 164: 46-52.
17. Lee SJ, Ikononou MG, Park H, Baek SY, Chang YS. Polybrominated diphenyl ethers in blood from Korean incinerator workers and general population. *Chemosphere.* 2007; 67(3): 489-497.
18. Jang YS, Seo JJ. Assessment of exposure levels of endocrine disruptors in human serum and food. Cheongju: Ministry Food and Drug Safety; 2010 Dec. Report No.: 1475005878.

19. Min BY, Wee SW, Kim SS, Kim KH, Kang WT, Oh JH, et al. Monitoring on polybrominated diphenyl ether (PBDEs) in the blood. Cheongju: Ministry Food and Drug Safety; 2009 Feb. Report No.: 1475003850.
20. Han SB, Cha EJ, Lee JE, Cho YM, Lee YJ, An JY et al. Development of advanced technology for analysis of exposure biomarkers using human derivatives. Sejong: Ministry of Environment; 2019 Dec. Report No. 1485015910. 627p.
21. Phillips DL, Pirkle JL, Burse VW, Bernert JT Jr, Henderson LO, Needham LL. Chlorinated hydrocarbon levels in human serum: effects of fasting and feeding. *Arch Environ Contam Toxicol*. 1989; 18(4): 495-500.
22. Liu R, Nelson DO, Hurley S, Petreas M, Park JS, Wang Y, et al. Association between serum polybrominated diphenyl ether levels and residential proximity to solid-waste facilities. *Environ Sci Technol*. 2016; 50(7): 3945-3953.
23. Jang YS, Kang JH, Lee DH, Park HG, Baek SI, Kim JC, et al. Assessment of exposure levels of PBDEs in human serum. Cheongju: Ministry of Food and Drug Safety; 2009 Dec. Report No.: 1475005029.
24. Drage DS, Heffernan AL, Cunningham TK, Aylward LL, Mueller JF, Sathyapalan T, et al. Serum measures of hexabromocyclododecane (HBCDD) and polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in reproductive-aged women in the United Kingdom. *Environ Res*. 2019; 177: 108631.
25. Lee YM, Bae SG, Lee SH, Jacobs DR Jr, Lee DH. Associations between cigarette smoking and total mortality differ depending on serum concentrations of persistent organic pollutants among the elderly. *J Korean Med Sci*. 2013; 28(8): 1122-1128.
26. Moon HJ, Lim JE, Jee SH. Association between serum concentrations of persistent organic pollutants and smoking in Koreans: a cross-sectional study. *J Epidemiol*. 2017; 27(2): 63-68.
27. Kim MJ, Choi S, Kim S, Lee I, Moon MK, Choi K, et al. Sex, menopause, and age differences in the associations of persistent organic pollutants with thyroid hormones, thyroxine-binding globulin, and peripheral deiodinase activity: a cross-sectional study of the general Korean adult population. *Environ Res*. 2022; 212(Pt A): 113143.
28. Allen JG, Gale S, Zoeller RT, Spengler JD, Birnbaum L, McNeely E. PBDE flame retardants, thyroid disease, and menopausal status in U.S. women. *Environ Health*. 2016; 15(1): 60.
29. Chen A, Chung E, DeFranco EA, Pinney SM, Dietrich KN. Serum PBDEs and age at menarche in adolescent girls: analysis of the National Health and Nutrition Examination Survey 2003-2004. *Environ Res*. 2011; 111(6): 831-837.
30. Zota AR, Geller RJ, Romano LE, Coleman-Phox K, Adler NE, Parry E, et al. Association between persistent endocrine-disrupting chemicals (PBDEs, OH-PBDEs, PCBs, and PFASs) and biomarkers of inflammation and cellular aging during pregnancy and postpartum. *Environ Int*. 2018; 115: 9-20.
31. Choi S, Kim HJ, Kim S, Choi G, Kim S, Park J, et al. Current status of organochlorine pesticides (OCPs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) exposure among mothers and their babies of Korea-CHECK cohort study. *Sci Total Environ*. 2018; 618: 674-681.
32. Pumarega J, Gasull M, Lee DH, López T, Porta M. Number of persistent organic pollutants detected at high concentrations in blood samples of the United States population. *PLoS One*. 2016; 11(8): e0160432.
33. Makey CM, McClean MD, Braverman LE, Pearce EN, He XM, Sjödin A, et al. Polybrominated diphenyl ether exposure and thyroid function tests in North American adults. *Environ Health Perspect*. 2016; 124(4): 420-425.
34. Chevrier J, Harley KG, Bradman A, Gharbi M, Sjödin A, Eskenazi B. Polybrominated diphenyl ether (PBDE) flame retardants and thyroid hormone during pregnancy. *Environ Health Perspect*. 2010; 118(10): 1444-1449.
35. Kim S, Park J, Kim HJ, Lee JJ, Choi G, Choi S, et al. Association between several persistent organic pollutants and thyroid hormone levels in serum among the pregnant women of Korea. *Environ Int*. 2013; 59: 442-448.
36. Kweon DJ, Kim MK, Zoh KD. Distribution of brominated flame retardants and phthalate esters in house dust in Korea. *Environ Eng Res*. 2018; 23(4): 354-363.
37. Park SA, Watanabe I, Lee WS, Lee DH, Min BY, Honda K. Concentrations and congener distributions of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in indoor house dust samples. *J Korean Soc Environ Anal*. 2015; 18(2): 112-120.
38. Besis A, Samara C. Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in the indoor and outdoor environments-a review on occurrence and human exposure. *Environ Pollut*. 2012; 169: 217-229.
39. Stapleton HM, Eagle S, Sjödin A, Webster TF. Serum PBDEs in a North Carolina toddler cohort: associations with handwipes, house dust, and socioeconomic variables. *Environ Health Perspect*. 2012; 120(7): 1049-1054.
40. Saquib Q, Siddiqui MA, Ahmed J, Al-Salim A, Ansari SM, Faisal M, et al. Hazards of low dose flame-retardants (BDE-47 and BDE-32): influence on transcriptome regulation and cell death in human liver cells. *J Hazard Mater*. 2016; 308: 37-49.
41. Jacobson MH, Barr DB, Marcus M, Muir AB, Lyles RH, Howards PP, et al. Serum polybrominated diphenyl ether concentrations and thyroid function in young children. *Environ Res*. 2016; 149: 222-230.
42. Yang J, Ma Y, Zhang X, Liao X, Yang Y, Sweetman A, et al. The potential association of polybrominated diphenyl ether concentrations in serum to thyroid function in patients with abnormal thyroids: a pilot study. *Ann Palliat Med*. 2021; 10(8): 9192-9205.
43. Ministry of Food and Drug Safety (MFDS). Research for monitoring of PBDEs distribution level in food groups. Cheongju: MFDS; 2009 Nov. Report No.: 1475005067.

〈저자정보〉

박동윤(연구교수), 이채관(교수)