

◆ 주제발표 ◆

SL8(IA)

다이옥신의 다매체·다경로 인체 노출 평가

Multimedia and multiroute human exposure of dioxin

신 동 천 · 양 지 연 · 박 성 은 · 임 영 옥

연세대 의과대학 환경공해연구소

1. 서 론

몇 년 전 “The stolen future” 라는 책이 발간된 이후 선진국을 중심으로 환경호르몬(내분비 교란물질)에 대한 관심이 높아지고 있으며, 우리 나라에서도 환경호르몬 물질의 규명과 분석 기술 개발 등 여러 가지 대응 대책을 마련하고자 하는 학계의 노력이 일고 있다.

특히 우리가 살아가고 있는 생태계에서 배출되고 있는 환경호르몬물질들 중에서 소각로, 산업공정 등 다양한 배출원을 가지고 있으며 또한 강한 독성을 가지고 있는 것으로 알려진 다이옥신은 인류가 만든 여러 가지 오염물질 중에서도 특별히 관심을 가져야 하는 물질이다. 환경 중에 배출된 다이옥신은 식품, 피부접촉, 대기, 음용수 및 토양 등의 매체를 통하여 인간의 건강과 자연 생태계에 유해 영향을 미치고 있다.

환경 중 다이옥신의 배출량은 극미량이라는 하나 높은 지용성 물질로써 환경 매체간 이동 및 먹이사슬을 통해 생체농축현상을 일으키는 것이 밝혀지면서 그로 인한 유해성 야기되기 시작하였으며, 특히, 1994년 미국 EPA에서 다이옥신에 대한 재평가를 통해 다이옥신이 인간에게 있어서 발암 물질이라는 증거를 찾을 수 없지만 발암물질일 수 있다는 가능성을 제시하고 있어, 선진국에서는 다이옥신에 대한 적극적인 연구가 진행되고 있다.

이미 여러 선진국에서는 다이옥신의 강한 독성으로 인한 영향을 고려하여 각종 규제를 실시하고 있으며 우리나라도 소각장의 급증 등을 고려하여 불 때 빠른 시일 내에 합리적이고 과학적인, 적절한 관리대안이 제시되어야 할 때이다.

따라서 본 연구에서는 우리나라에서 소각 및 연소 시설 등의 주 오염원에 의한 다이옥신 배출량을 예측해보고, 이로 인한 인체 노출량 및 건강 영향 등을 평가해보고자 한다.

2. 본 론

지구상에는 수많은 다이옥신 화합물들의 수많은 오염원이 존재하고 다이옥신의 특성상 장거리 이동이 가능하여 모든 환경 매체에서 다이옥신이 발견되고 있다. 특히, 유독성 다이옥신은 지구상에서 임의의 사용목적을 가지고서 제조된 것이 아니라 산업 공정과 불완전 연소 과정에서 부수적으로 발생되어 환경 오염 물질로써 존재하고 있다. 이러한 다이옥신의 일반적인 오염원으로는 산업공정과 연소공정으로 구분되며, 이중 가장 중요한 오염원으로는 불완전 연소가 고려되고 있다(표 1).

표 2에는 미국 EPA(1994)에서 제안하고 있는 산업공정 및 소각시설별 배출지수(emission factor)를 적용하여 우리나라에서의 주요 산업공정 및 소각시설로 인한 다이옥신의 총 배출량을 추계하였다(표 2). 우리나라에서 소각시설에서 발생하는 다이옥신의 양은 총 발생량의 72%가 되는 것으로 추계되었으며, 미국, 네델란드, 스위스에서도 소각시설에 의한 기여율이 75%를 상회하는 것으로 나타났으며, 폐기물의 소각처리율이 높은 일본의 경우에는 96%를 차지하고 있는 것으로 산출되었다.

소각 및 연소 시설에 의해 대기중으로 배출되는 다이옥신은 입자상 혹은 증기상 물질로 배출되어 호흡을 통해 인체에 노출되고, 공기에서 토양으로 전이되고, 이로 인해 오염된 과일이나 채소 등을 섭취함으로써 노출된다. 다이옥신의 강한 생태계 잔류성 및 축적성으로 인해 먹이사슬을 통한 체내 노출이 쉽게 이루어지며, 따라서 인체 노출량의 대부분이 어패류, 소고기 등 육류, 우유 및 낙농제품 등 식품에 기인한 것으로 보고되고 있다(US EPA, 1994). 표 3에는 1개의 소각시설 굴뚝에서 배출되는 다이옥신에 의한 사람의 일일 평균 노출량을 예측하여 보았다.

Table 1. 우리나라에서의 산업공정 및 소각으로 인한 다이옥신 배출원.

구분	발생 요인
화학물질의 제조	<ul style="list-style-type: none"> Chlorophenol류를 포함하는 유기염소계화합물의 제조시 부가적으로 생성 (2,4,5-T농약에 약 0.1ppm 다이옥신 존재) Chloralkali 산업중 흑연전극제조시 다이옥신 형성 (전극슬러지에 650mg/g 다이옥신 존재)
화학물질의 폐기 처리	<ul style="list-style-type: none"> Chlorophenol류 사용 후 산업폐기물처리시 다이옥신 발생 (주로 수계를 통한 주 오염원)
펄프·제지공정	<ul style="list-style-type: none"> 염소계 표백제를 이용한 펄프 표백과정 중 형성 Coffee filter, 냅킨, 종이접시, 종이컵 등에 ppt수준의 다이옥신 함유 펄프 중에 함유되어 있는 리그닌이 전구체로 작용하여 다이옥신 생성유도
금속산업 (제철·제강 산업)	<ul style="list-style-type: none"> 금속의 제련·제강산업공정 중 열처리·분해과정에서 다이옥신 형성 Scrap 금속의 재생과정 중 PVC 연소로 인해 다이옥신 형성 금속절단유로 사용되는 파라핀으로 인해 다이옥신 형성
정유산업 및 자동차 배기가스	<ul style="list-style-type: none"> 석유정제시에 다이옥신 형성 유연연료(leaded fuel) 연소시 다이옥신 형성 (무연연료연소의 약 20배 수준)
소각 시설	<ul style="list-style-type: none"> 쓰레기 중에 불순물로서 다이옥신류의 함유되어 배출 염소치환형의 벤젠 핵을 가진 다이옥신류의 전구체의 존재하여 배출 벤젠 핵을 가지지는 않지만 고온에서의 반응에 의하여 다이옥신류와 염소화합물의 전구체를 형성할 가능성이 있는 유기염소 화합물의 존재로 인해 다이옥신 형성 (PVC, 사염화탄소, 사염화에틸렌, 클로로포름 등) 염소를 함유하고 있지 않은 유기물이나 탄소 등과 무기염소 화합물의 존재로 인해 다이옥신 형성 (예를 들면, HCl, Cl₂, NaCl, AgCl₃)

Table 2. 각 나라별 대기 중 다이옥신 배출량 비교.

배출원	한국 ^a (gTEQ/yr)	서독 ^b (gTEQ/yr)	오스 트리아 ^c (gTEQ/yr)	영국 ^b (gTEQ/yr)	네델란드 ^b (gTEQ/yr)	스위스 ^b (gTEQ/yr)	미국 ^b (gTEQ/yr)	일본 ^c (gTEQ/yr)
일반 쓰레기 소각	303.1	5.4-432	3	1,150	382	90-150	3,000	3,100-7,400
하수 오폐수 소각	-	0.01-1.1	< 1	-	0.3	-	23	5
유해 폐기물 소각	0.5	0.5-72	6	11	16	< 1	35	490
병원 폐기물 소각	2.2	5.4	4	32	2.1	2-3	5,100	80-240
산업 / 생산 공정								
펄프 / 종이 생산 공정	4.7		4			1-5	2.7	47
화학물질 생산 공정					0.5			
유리 화학물질의 생산								
금속 생산 및 제련 공정								
다이아 연소							0.3	
철금 용해 및 제련		1.3-18.9	19 ^d		30 ^d	6-16 ^d		
비철금 용해 및 제련	113.8	38-380			1.5		230	250
선선 재생 공정								
드럼 및 배관 간척						2-14 ^e	1.7	
발전 및 에너지 산업								
자동차의 석유 연소								
- 유연 휘발유		7.2	<1 ^f	613 ^g	7.0 ^g			
- 무연 휘발유		0.8					1.3	0.07
- 경유		4.6					85	
목재 소각			70	16	12		40 ^h 320 ^h	0.2
석탄 연소 - 가정용		1.1	<1 ^b	989	3.7 ^h			
- 산업용				301				
- 기타				199				
석유 연소 - 가정용		1.2		2 ^k				
숯 및 연탄 연소 (가정용)		1.8						
총 계	424.3	67-926	<109	3,870	484	100-200	9,200	3972-8432

a. 배출지수(emission factor, US EPA, 1994)를 적용하여 추계한 우리나라의 다이옥신의 총 배출량 ; 산출 기준 연도 = 1995

b. 자료출처 : 미국 환경청(US EPA, 1994) ; 산출 기준 연도 = 1987 - 1990

c. 자료출처 : Masaru T (1997) ; 산출 기준 연도 = 1990

d. 당화(sintering) 과정을 포함한 모든 금속 산업을 총괄하여 산출

e. 모든 연료 형태를 총괄하여 산출

f. 모든 연료를 사용하는 모든 연소 장치로 인한 발생량

g. 가정에서의 목재 소각으로 인한 발생량

h. 산업장에서의 목재 소각으로 인한 발생량

i. "석유 연소"로 인한 총 발생량은 2gTEQ/yr로 산출

Table 3. 하나의 소각시설 굴뚝에서의 배출된 다이옥신에 의한 일일 평균 인체 노출량

노출경로	2,3,7,8-TCDD (ng/kg-day)	Dioxin-TEQ (TEQ ng/kg-day)
도양섭취	4×10^9	8×10^8
도양의 피부접촉	5×10^{11}	1×10^9
흡입	1×10^9	2×10^8
음용수 섭취	3×10^{11}	4×10^{10}
생선 섭취	1×10^9	2×10^8
과일 섭취	3×10^{10}	2×10^8
야채 섭취	4×10^{10}	2×10^8
소고기 섭취	9×10^8	2×10^6
우유 섭취	3×10^8	6×10^7
일일 평균 인체 노출량	1×10^4	3×10^6

표 3에 나타난 바와 같이, 하나의 소각시설에 의해 소량의 다이옥신이 대기 중으로 방출됨으로 인한 직접적인 노출량(흡입, 도양 섭취 및 접촉, 음용수 섭취)은 매우 미미한 수준이지만, 이것이 먹이사슬을 따라 체내에 축적, 농축되면서 식품이라는 또 다른 간접적인 매체를 통해 인간에게 노출되어 질 때에는 직접적인 노출량의 약 25배 이상의 수준으로 증가됨을 알 수 있다. 이러한 생체 축적 및 농축 특성에 의해 다이옥신의 직접적인 인체 노출량은 전체 노출량의 2% 이하인 것으로 알려지고 있으며, 이에 비해 다이옥신에 오염된 식품 섭취에 의한 노출은 98% 정도를 차지하고 있는 것으로 보고되고 있다(US EPA, 1994). 미국 일반 시민들의 다이옥신에 대한 1일 평균 인체 노출량은 1.0~3 TEQ pg/kg-day 수준인 것으로 조사된 바 있으며, 우리나라의 경우에는 주 노출경로인 식품 중의 다이옥신 오염도 자료가 미흡한 관계로 아직까지 평가되지 못하고 있다. 신동천과 장윤석의 연구에 의하면 우리나라에서 현재 시판되고 있는 우유 중 다이옥신 농도가 0.05 TEQ pg/g인 것으로 조사되었으며, Hashimoto 등(1998)에 의하면 우리나라 남해에 서식하는 조개류에서 다이옥신 농도가 0.37 TEQ pg/g인 것으로 평가된 바 있다. 이러한 우리나라 일부 식품 중 다이옥신 농도는 유럽 지역의 우유(0.05 TEQ pg/g)나 조개류(0.3 pg/g)에서의 농도와 매우 유사한 것으로 나타났다. 이러한 경향을 바탕으로, 다소 무리는 따르지만, 유럽 지역의 식품 중 다이옥신 농도를 바탕으로 우리나라 성인의 일일 다이옥신 섭취량을 예측하여 보았다(표 4). 호흡을 통한 노출량은 서울역에서 측정된 대기 중 다이옥신 농도를 바탕으로 산출하였으며(연세대 환경공해연구소, 1998), 도양에서의 다이옥신 농도는 평균 18.39 TEQ pg/g(장윤석 등, 1998)을 적용하였다. 그 결과 우리나라 일반 성인이 다이옥신에 노출되는 일일 노출량은 70.4TEQ pg/day로 예측되었으며, 성인 평균 체중 66kg(1995년 제6차 '한국인 영양 권장량'추계시 적용된 체중)을 고려한 단위 체중당 노출량은 1.07 TEQ pg/kg-day로 예측되었다. 이러한 인체 노출량은 현재 미국 성인의 일일 평균 다이옥신 인체 노출량인 1.7TEQ pg/kg-day(1~3TEQ pg/kg-day)에 비해 약간 낮은 수준이기는 하나, 현재 미국에서 제안하고 있는 일일 허용 노출량 1.0 TEQ pg/kg-day와 비교한다면 매우 안심할 수 있는 수준은 아닌 것으로 평가된다.

표 5에는 우리나라 일부 성인에서의 지방조직과 모유에서의 다이옥신 농도를 다른 나라들과 비교하여 나타내고 있다. 독일이 혈액 및 지방조직에서 비교적 높은 농도로 나타났으나, 모유의 경우에는 우리나라가 다소 높은 것으로 나타났다. 우리나라의 지방조직과 모유 중 PCDDs/PCDFs의 함유 비율은 각각 0.8, 0.4로 산출되어 미국이나 독일(PCDDs/PCDFs 함유 비율 ≥ 1)에 비해 푸란류의 함유량이 높은 것으로 평가된다. 이러한 차이는 인종간의 차이도 있겠지만, 그것보다는 식습관의 차이에 의한 영향이 더 클 것으로 사료된다. 우리나라 일부 성인에서의 지방조직 중 다이옥신 농도는 다른 국가들보다 비교적 낮은 수준으로 평가된 반면, 모유에서의 농도는 높게 평가된 것은 성별 및 지역특성에 의한 영향으로 사료된다. 장윤석 등(1997)에 의한 우리나라 지방조직 중 다이옥신 농도는 경상남도 지역에 거주하는 성인 남녀를 대상으로 평가된 것이며, 여성이 16.5(TEQ pg/g, lipid)로 나타나 남성(19 TEQ pg/g, lipid)보다 약간 낮게 나타났다. 신동천 등(1997)이 모유 시료는 서울 및 인천 지역에 거주하는 초산모의 모유 중 다이옥신 농도로써, 서울 지역(24 TEQ pg/g fat)에서의 농도가 인천 지역(11 TEQ pg/g fat)에서보다 매우 높게 나타났다. 이와 같이 다이옥신의 인체 축적량은 성별, 지역적 특성 및 개인적인 생활 습성에

따라 매우 다양하게 평가되고 있으므로 우리나라의 일반적인 인체 축적량을 평가하기 위해서는 전국적인 노출평가 연구가 시급히 시행되어야 할 것이다.

Table 4. 우리나라 일반 성인의 다이옥신 일일 평균 인체 노출량 예측

Food	Media concentration ¹⁾ (TEQ pg/g)	Intake rate ²⁾ (g/day)	Daily intake of Dioxin (TEQ pg/day)	Percent of daily intake (%)
Beef	0.32	31.4	10.0	14.2
Chicken	0.21	8.2	1.7	2.4
Pork	0.06	21.6	1.3	1.8
Fish	0.15	21.6	3.3	4.7
Egg	0.93	50.8	47.2	67.0
Milk	0.05	56.2	2.8	4.0
Dairy	0.08	9.4	0.8	1.1
Inhalation	0.056 ³⁾	20 ⁴⁾	1.1	1.6
Soil ingestion	18.39 ⁵⁾	0.02 ⁶⁾	0.4	0.6
Soil dermal uptake	18.39 ⁵⁾	-	1.8 ⁷⁾	2.6
Water ingestion	-	-	-	-
Total	-	-	70.4	100.0

1) 각 식품에 대한 다이옥신 농도는 유럽국가 자료 인용(Furst 등, 1990 ; Beck 등, 1989)

2) '95 국민 영양 조사 결과보고서 (1995)

3) 대기 중 농도=0.056 TEQ pg/m³ (연세대 환경공해연구소, 1998)

4) 일일 호흡율=20m³/day

5) 토양 중 농도=18.39TEQ pg/g (장윤석 등, 1998)

6) 성인의 일일 토양 섭취율=0.02 g/day (US EPA, 1994)

7) 이효민 등(1998)의 자료 인용

Table 5. 혈액, 지방조직 및 모유에서의 다이옥신 농도 비교.

국가	혈액 (TEQ ppt, lipid)	지방조직 (TEQ pg/g, lipid)	모유 (TEQ pg/g fat)
한국 ¹⁾	-	18	20.5
미국 ²⁾	41	24	11.8
러시아 ³⁾	17	-	11.7
독일 ⁴⁾	42	69	16.6

1) 지방조직 : 장윤석 등(1997), 모유 : 신동천 등(1997)

2) US EPA(1994)

3) 혈액 : Schecter 등(1994a), 모유 : Traag 와 Yufit(1997)

4) Schecter 등(1994a)

표 4에서 추계된 것과 같이 우리나라 성인이 다이옥신에 1.07 TEQ pg/kg-day로 평생 노출된다면, 이로 인한 초과 발암 위험도는 다음과 같이 추산할 수 있다. 이때 다이옥신의 발암잠재력은 미국 EPA에서 제안하고 있는 1×10^{-4} (TEQ pg/kg-day)¹을 적용하였다.

다이옥신으로 인한 초과발암 위험도

$$\begin{aligned}
 &= \text{일일 평균 노출량(TEQ pg/kg-day)} \times \text{발암잠재력(TEQ pg/kg-day)}^{-1} \\
 &= 1.07(\text{TEQ pg/kg-day}) \times (1 \times 10^{-4})(\text{TEQ pg/kg-day})^{-1} \\
 &= 1.07 \times 10^{-4}
 \end{aligned}$$

표 6에는 우리나라의 인구를 고려한 인구 집단 초과 발암 위험도를 산출하였으며, 이를 미국, 독일 등의 국가들과 비교하여 나타내었다. 본 연구에서는 다이옥신으로 인한 초과 발암위해도가 백만명당 107명인 것으로 추계되었으며, 우리나라 총인구 4,686만명(보건복지부, 1998)을 고려한 인구집단 초과 발암 위험도는 5,014명/70년인 것으로 나타났다. 이러한 결과를 좀 더 단순화시켜 보면, 우리나라에서 다이옥신의 노출에 의해 연간 약 70여명이 추가적으로 암이 발생할 가능성이 있을 것이다. 이와 같은 다이옥신으로 인한 초과 발암 위험도는 그 산출과정에 있어 극한값(conservative approach)을 적용하기 때문에 실제적인 암 발생율은 본 연구에서 추계된 값을 초과하지는 않을 것이다.

현재 우리나라 사망원인 중 신생물(암)로 인한 것이 전체 사망률의 약 20%를 차지하고 있는 것으로 보고되고 있으며, 1987년에 비해 1996년의 총사망율은 8.9%가 감소한 것으로 나타난 반면, 암사망율은 16.5%가 오히려 증가된 것으로 나타나(보건복지부, 1998), 다이옥신 등과 같은 유해화학물질에 의한 인체 발암 영향이 지나친 기우이기만 한 것은 아니라고 사료된다.

Table 6. 다이옥신 노출로 인한 국가별 개인 및 인구집단 초과 발암 위험도 비교.

국가	한국	미국 ¹⁾	독일 ²⁾	영국 ³⁾	캐나다 ⁴⁾
일일 총 노출량 (TEQ pg/day)	70.4	119	89.3	125	91.7
일일 평균 노출량 (TEQ pg/kg-day)	1.07	1.70	1.37	1.92	1.41
총인구	46,860,000	260,000,000	77,600,000	58,000,000	27,000,000
초과 발암 위험도 (cases/10 ⁶ 명)	107	170	137	192	141
총인구에 대한 초과 발암 위험도	5,014	44,200	10,631	11,136	3,807

1) US EPA(1994) 2) Beck(1989) 및 Furst(1991) 3) Startin(1992) 4) Birmingham(1989)

3. 결 론

이상으로 우리나라에서 다이옥신의 주 오염원에 의한 배출량 및 이로 인한 인체 노출량과 건강 영향을 살펴보았다.

며칠전 마스크를 통해 보도된 식품 중 다이옥신 검출문제는 다이옥신이 발암물질일 뿐만 아니라 환경 호르몬 의심물질이기 때문에 더욱 관심의 대상이 되고 있다. 그 맹독성에 관해서는 1970년대부터 익히 알려져 왔으며, 이미 동물실험을 통해 간독성, 자궁내막증식증, 발암성, 면역독성, 생식 및 발육독성 등을 야기하는 것으로 평가되었다. 특히 다이옥신은 강한 생태계 잔류성 및 축적성 때문에 먹이사슬을 통한 체내 침투가 쉽게 이루어지는 것으로 밝혀져 더욱 심각한 환경 문제로 다루어지고 있다.

다이옥신은 이미 우리 생활과 관련된 모든 곳에서 발생하여 분포하고 있고 우리가 원하는 원하지 않든 간에 노출될 수밖에 없는 상황에 있는 것임에 틀림없다. 그렇기 때문에 미국에서도 인체 허용 기준을 이론적 목표치와 현실적 기준치로 이원화하여 제시하고 있다. 즉, 현재 인간에게 노출되고 있는 상황을 감안하여 기준치로 하되 장기적으로는 목표치에 근접할 수 있는 노력이 필요한 것이다.

결론적으로 다이옥신을 비롯한 환경 호르몬에 대한 문제는 국민, 정부, 학계 그리고 사회단체 등 모두가 이해의 폭을 좁히고 조용하고도 지속적이고 참을성 있게 문제 해결에 임하는 것이 좋을 듯 하다. 우리 국민의 다이옥신 체내 축적도는 얼마나 되는지 등의 근본적인 자료 확보를 위한 조사가 계속되어야 할 뿐 아니라 다이옥신과 같은 환경 호르몬의 올바른 이해를 위한 노력과 구체적인 장기적인 정책의 수립이 필요한 시기이다.

참 고 문 헌

- 연세대 환경공해연구소. (1998) 대기오염물질의 위해성 평가 및 관리. 환경부
- Beck H. et al. (1989) PCDD and PCDF body burden from food intake in the Federal Republic of Germany. Chemosphere Vol 18 No 1-6 pp. 417-424
- Birmingham B. et al. (1989) Dietary intake of PCDD and PCDF from food in Ontario, Canada. Chemosphere Vol 19 pp. 507-512
- Furst C. et al. (1990) Levels of PCDDs and PCDFs in food stuffs from the Federal Republic of Germany. Chemosphere Vol 20 No 7-9 pp. 787-792
- Hashimoto et. al. (1998) Polychlorinated dibenzo-p-dioxins and polychlorinated dibenzofurans in shellfishes from south coast of Korea. Chemosphere Vol 37 No 5 pp. 951-959
- Kang YS. et al. (1997) Organochlorinated pesticides, polychlorinated biphenyls, polychlorinated

- dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans in human adipose tissue from western Kyungnam, Korea. *Chemosphere* Vol 35 No 10 pp. 2107-2117
- Lee HM. et al. (1998) Estimating multiple human exposure based on soil PCDD/Fs level using pathway exposure factors. *Organohalogen compounds* Vol 38 pp. 53-58
- Masaru T. History, policy and status of dioxin in Japan. '97 Seoul Dioxin Symposium, 1997: Oct 15
- Schechter A. et al. (1994a) Chlorinated dioxins and dibenzofurans in human tissue from general populations : a selective review. *Environ. Health Perspec.* Vol 102 Sup. 1 pp. 159-171
- Shin DC. et al. Estimation of air emission for dioxin using a mathematical model in two large cities of Korea. *Organohalogen compounds* Vol 36 pp. 449-453
- Startin JR. (1994) Dioxin in food ; Food surveillance paper. HMSO London No 31
- Traag WA and Yufit S. (1997) The contamination of human milk polychlorinated dibenzo-p-dioxins, -dibenzofurans and -chlorobiphenyls in Russia. *Organohalogen compounds* Vol 33 pp. 524-529
- US EPA. (1994) Estimating exposure to dioxin-like compounds : Vol II. Properties, sources, occurrence and background exposures. Office of Research & Development Washington DC 20460.