

다이옥신류의 위해성과 식품

김 재 형/국립환경연구원 환경연구사

1. 서 론

다이옥신류는 베트남전쟁시에 사용된 고엽제 (2, 4, 5-T)에 불순물로서 포함되어 있는 독성물질로서 유명하다. 베트남에서의 유산이나 선천성이상아의 다발, 베트남귀환 병사의 암발생 등이 이 물질에 의한 영향으로 지적되고 있다.

다이옥신류에 의한 환경오염은 유럽을 중심으로 꽤 전부터 문제시되어 왔다. 폐기물소각이나 금속정련시에 발생하거나 농약 등 각종의 화학물질을 제조할 때에 부생하는 등의 예가 알려지고 있지만 그 중에서도 폐기물소각이 최대의 원인이라고 말해지고 있다.

최근에 와서는 지금까지 알려지고 있는 발암성을 나타내는 수준보다도 더욱 미량의 다이옥신류에서 자궁내막증과 불임증의 원인이 될 수 있다는 연구결과들이 발표되면서 사회적인 관심이 한층 더 높아지고 있다.

다이옥신류와 PCB류는 환경이나 식품중에 널리 존재한다. 이들의 존재는 독성과 잔류성에 기인하여 인간건강과 환경에 위해요소로 널리 인식되고 있다. 비록 다이옥신류나 PCB류에 대한 고농도의 폭로는 작업환경이나 사고의 결과로서 나타나기도 하지만 식품섭취에 의해 인간에게 폭로되는 일반적인 경로를 나타내고 있다. 환경중에 배출된 다이옥신류는

공기, 물 등으로 함께 인간의 체내에 받아들여지기도 하지만 양적으로 가장 많은 것은 식품과 함께 섭취되는 것으로 인식되고 있다.

저농도의 다이옥신류가 환경이나 인체에 주는 영향이 큰 것으로 시간이 지남에 따라 판명되고 있기 때문에 현재 전세계적으로 다이옥신류에 대한 대책이 수립·시행되고 있다.

여기서는 다이옥신류의 위해성과 식품과의 관계, 그리고 다이옥신류 오염을 막기 위한 선진국의 대책 방향에 대하여 소개한다.

2. 다이옥신류의 종류 및 독성 평가

다이옥신류는 일반적으로 폴리염화디벤조파라다이옥신 (PCDD) 및 폴리염화디벤조퓨란 (PCDF)의 혼합물을 가리킨다. 다이옥신류에는 많은 이성체가 있어 PCDD는 75종류, PCDF에는 135종류의 이성체가 존재한다. 다이옥신류의 독성은 이성체마다 다르기 때문에 이성체중에서 가장 높은 독성을 갖는 2,3,7,8-사염화디벤조파라다이옥신 (2,3,7,8-TCDD)의 독성을 1로 하였을 때 다른 이성체의 상대적인 독성을 독성등가계수 (TEF)로 나타내며, 이것을 사용하여 이성체의 독성을 2,3,7,8-TCDD의 등량 (TEQ)으로서 환산하고 표시하는 것이 일반적이다. TEF에 관해서는 독성평가에 대한 정보의 집적에 의해 개정을 계속할

수 있고, NATO 제국의 공동연구에 근거하는 국제 독성등가계수 (I-TEF)와 세계보건기구 (WHO)가 제안하고 있는 독성등가계수 (WHO-TEF, 1993, 1997년) 등이 있다.

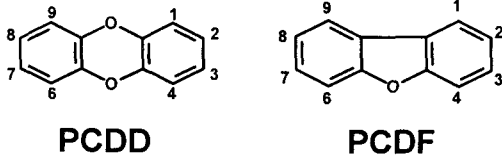


그림 1. 다이옥신과 퓨란의 구조

코프라나-PCB란 209종류의 PCB중 이성체가 扁平構造를 갖는 다이옥신류와 유사한 독성을 가지는 화학물질이다.

1997년 WHO 자문회의에서는 새로운 독성학적 정보데이터베이스를 기초로 한 다이옥신류와 PCB류의 TEF에 대한 재평가가 있었다. 개정안은 1988년에 NATO/CCMS에 의해 제안되었던 국제등가계수 (International TEF)의 수정안이 포함되어 있으며, 1994년 새롭게 추가된 PCB류에 대한 WHO-TEF도 포함되어 있다.

표 1. 다이옥신류 및 코프라나-PCB의 독성등가계수(TEF)

a) 다이옥신류

PCDDs, PCDFs	WHO-TEF (1997)	International-TEF (I-TEF, NATO, 1988)
2,3,7,8-TCDD	1	1
1,2,3,7,8-PCDD	1	0.5
1,2,3,4,7,8-HCDD	0.1	0.1
1,2,3,6,7,8-HCDD	0.1	0.1
1,2,3,7,8,9-HCDD	0.1	0.1
1,2,3,4,6,7,8-HCDD	0.01	0.01
1,2,3,4,6,7,8,9-OCDD	0.0001	0.001
2,3,7,8-TCDF	0.1	0.1
1,2,3,7,8-PCDF	0.05	0.05
2,3,4,7,8-PCDF	0.5	0.5
1,2,3,4,7,8-HCDF	0.1	0.1
1,2,3,6,7,8-HCDF	0.1	0.1
1,2,3,7,8,9-HCDF	0.1	0.1
2,3,4,6,7,8-HCDF	0.1	0.1
1,2,3,4,6,7,8-HCDF	0.01	0.01
1,2,3,4,7,8,9-HCDF	0.01	0.01
1,2,3,4,6,7,8,9-OCDF	0.0001	0.001
다른 PCDDs, PCDFs	0	0

b) 코프라나-PCB

	이 성 체	IUPAC No.	WHO-TEF(1997) 인간/포유류	WHO/IPCS-TEF (1993)
Non-ortho	3,4,4',5-TeCB	#81	0.0001	-
	3,3',4,4'-TeCB	#77	0.0001	0.0005
	3,3',4,4',5-PeCB	#126	0.1	0.1
	3,3',4,4',5,5'-HpCB	#169	0.01	0.01
Mono-ortho	2',3,4,4',5-PeCB	#123	0.0001	0.0001
	2,3',4,4',5-PeCB	#118	0.0001	0.0001
	2,3,3',4,4'-PeCB	#105	0.0001	0.0001
	2,3,4,4',5-PeCB	#114	0.0005	0.0005
	2,3',4,4',5,5'-HpCB	#167	0.00001	0.00001
	2,3,3',4,4',5-HpCB	#156	0.0005	0.0005
	2,3,3',4,4',5'-HpCB	#157	0.0005	0.0005
	2,3,3',4,4',5,5'-HxCB	#189	0.0001	0.0001
Di-ortho	2,2',3,4,4',5,5'-HxCB	#180	-	0.00001
	2,2',3,3',4,4',5-HxCB	#170	-	0.0001

주) 본 글에서 다이옥신류는 폴리염화디벤조파라다이옥신 (PCDD) 및 폴리염화디벤조퓨란 (PCDF)를 가리켜 코프라나-PCB는 포함하지 않은 것으로 기술함.

TEF개념은 근본적으로 불확실성을 가지고 있기 때문에 1998년 5월에 TDI의 재평가를 위한 WHO 자문회의에서 추가적으로 다이옥신류와 같은 활동도를 지니고 있는 물질이 포함되어야 하며 TCDD 단독으로 사용시 이러한 물질들로부터 인간에의 위해성을 과소평가할 수 있다고 결론짓고 있다.

여러 국가에서 일반 환경에서의 인간에 대한 다

이옥신류의 폭로와 체중을 감안하여 수정된 TEF를 사용할 경우 일반적으로 TCDD는 전체 다이옥신류의 10~20%에 해당하며 다이옥신과 유사한 PCB류까지 포함시킬 경우 TCDD는 전체 다이옥신 및 PCB류에 대해 5% 미만이 된다.

1997년 WHO에 의해 수정된 TEF는 추후 TEQ의 계산에 사용될 것을 권고하고 있고, 이것은 기존의

I-TEF와 1994년의 PCB류가 포함된 WHO-TEF의 계산치와 비교하여 약 10%정도 증가하게 된다.

3. 다이옥신류와 PCB류의 인체폭로

다이옥신류와 이와 유사한 독성을 갖는 PCB류의 일일인체폭로는 선진국을 중심으로 많이 보고되고 있다. 지금까지 폭로량을 보고한 나라는 캐나다, 덴마크, 독일, 이태리, 일본, 네덜란드, 뉴질랜드, 노르웨이, 스페인, 영국 및 미국 등 11개국이다.

인체폭로의 90% 이상이 식품, 특히 동물계 식품을 통해 일어나는 것으로 예측되고 있다. 대기, 토양, 종이, 흡연 및 음료수와 같은 비식품으로 부터는 매우 적은 양이 폭로되고 있는 것으로 나타났다.

식품의 다이옥신류 오염은 주로 농업지역에서 다양한 오염원에 의해 발생된 배출물의 강하에 의해 야기된다. 다른 오염원으로는 이번 벨기에 오염사고와 같이 소, 돼지, 닭, 양식어 등의 사료가 오염되거나, 도시하수슬러지의 부적정처분, 목초지의 범람, 폐수유출, 염소표백된 포장재로 부터의 식품 또는 이송에 의해 오염될 수 있다.

PCB류에 대해서는 오염원 자체를 평가한 정보도 부족한 실정이다. 환경이나 식품에서의 PCB의 검출은 대개 과거에 배출되었던 것(PCB제도시 잔재물 등)이나 다이옥신류와 유사한 배출원일 것으로 추정하고 있다. 1970년대에 우리나라를 비롯한 많은 나라에서 환경중 PCB를 저감하기 위해 법적 규제조치를 행하였으나 아직도 PCB류는 일년에 몇 톤씩 환경중에 방출되고 있는 것으로 추정되고 있다. 비록 독성이 높은 코프라나-PCB류가 전체 PCB류의 몇 %밖에 안되나 여전히 대기중으로 배출되는 다이옥신류와 유사 PCB류는 수 kg이 될 것으로 선진국에서는 평가하고 있다. 이에 대해서는 추가적인 법적 규제를 위해 주요 배출원을 확인하는 연구가 요구된다.

(1) 식품중 다이옥신류와 코프라나-PCB류의 농도

식품중 다이옥신류의 농도는 환경중 이들의 농도와 매우 상관성이 높다. 다이옥신류는 친유성이기 때문에 동물의 지방조직에 축적되므로 지방분이 매우 낮은 식물성 식품에는 잔류성이 낮고 대개 검출한계이하인 것으로 알려지고 있다. 그러나 식물성 기름이나 지방분에는 농도가 높은 것으로 보고되고 있다.

몇몇 국가에서 동물계 식품에 대한 다이옥신류 농도는 대개 낙농제품(우유, 버터, 치즈)의 경우 0.7~2.5 pg I-TEQ/g-지방, 소고기, 돼지고기 및 닭고기에 대해서는 0.4~1.8 pg I-TEQ/g-지방의 범위에 있다. 동물의 종류에 따라 변화폭이 크기는 하지만 동물의 간에서의 농도는 육류보다도 훨씬 높게 나타나고 있다.

어류 및 어류의 지방에서는 동물계 제품에서 보다 상대적으로 높은 다이옥신류가 검출되고 있다. 독일과 네덜란드에서는 2.4~48.7 pg I-TEQ/g-지방이 검출된 적이 있으며, 이것을 제품기준으로 환산하면 0.5~5 pg I-TEQ/g-어류가 된다. 또한 어유(魚油)에서도 지역적으로 차이는 있겠지만 대개 높은 다이옥신류 농도를 나타내고 있다. 네덜란드에서의 조사 결과 정제어유에서의 다이옥신류 평균농도는 약 1 pg I-TEQ/g-어유로 나타났다.

PCB류와 다이옥신류는 비슷한 화학적, 물리학적 특성을 지니고 있어 PCB류의 농도도 다이옥신류와 마찬가지로 환경중 농도와 크게 관련이 있으며 역시 동물의 지방조직에 축적된다. 그래서 식물성 식품중 PCB류의 농도는 매우 낮아 대개는 현재의 검출한계 이하이다.

몇몇 국가에서 식품중 측정된 총 PCB류의 농도는 낙농제품의 경우 10~200 ng/g-지방이며, 육류의 경우는 7~500 ng/g-지방이다. 코프라나-PCB류의 농도는 네덜란드 낙농제품이 약 2 pg WHO-TEQ/g-

지방 이었다.

동물계 제품과 비교하여 상대적으로 높은 농도의 PCB류가 어류의 지방에서도 발견되고 있다. 어류에서 PCB농도는 10~200 ng/g의 범위에 있고 어유(魚油)에서도 대개 높은 농도의 PCB류가 검출되고 있다.

(2) 다이옥신류와 코프라나-PCB류의 식품을 통한 섭취

다수의 선진국에서 식품을 통한 다이옥신류의 섭취에 관한 조사가 수행되어 일일섭취범위가 50~200 pg I-TEQ/인/일 또는 60 kg 성인에 대해 1~3 pg I-TEQ/kg-체중/일 로 알려져 있다.

만약 코프라나-PCB류 (non-ortho 및 mono-ortho PCB류)까지 포함시키면 일일섭취량은 TEQ로서 2~3배 높아진다. I-TEQ로 표시하여 일일섭취량이 높은 식품으로는 카나다는 우유, 계란 및 육류, 덴마크는 어류 (50%), 핀란드도 어류 (63%)와 유제품 (33%), 독일은 우유 (30%), 어류 (30%) 및 육류 (30%), 일본은 어류, 녹색채소류, 우유 및 유제품, 육류 및 계란 그리고 곡류와 토마토이며, 네덜란드는 우유 (50%)와 어유 (魚油), 뉴질랜드는 육류, 노르웨이는 유제품, 영국은 우유, 육류, 기름 및 지방, 미국은 우유 및 기타 낙농제품 (50-80%)이다.

식품으로부터의 다이옥신류의 일일섭취량과 관련된 보다 광범위한 연구 (Total Dietary Study)는 캐나다 (1989년), 독일 (1992년), 네덜란드 (1997년), 영국 (1995, 1997년), 미국 (1994, 1997년) 과 최근의 뉴질랜드 (1998년)와 일본 (1998년)에서 보고되고 있다. 이들 나라에서 사용한 방법은 대개 비슷한 방법이 이용되고 있으며, 전통적으로 측정된 식품중 오염물질의 농도에 식품소비량을 곱하는 형태를 취하고 있다. 이들 나라에서 예측된 섭취량을 표 2에 요약하여 나타내었다.

여기서는 체중당 농도로서 일일섭취량을 표기하고 있음에 유의하여야 한다. 예를 들어 이들 연구에서 이용된 실제 체중은 50 kg에서 80 kg까지로 다양하며, 이러한 평균체중에 대한 분류는 여성과 남성, 그리고 연령별로 나라마다 다르고 그 대표성문제에 대하여도 많은 논란이 있다.

몇몇 나라에서는 식품섭취량을 추산시 다른 방법을 적용하기도 하여 이에 따라 결과도 큰 차이를 보이게 된다. 이들 자료를 검토할 때 대상 식품의 종류, 시료채취나 환산방법에 주의하여야 한다. 그리고 이 분야에 비전문가들은 검출한계를 어떻게 정의하는가에 따라 결과가 크게 달라질 수 있다는 것을 명심하여야 한다. 독일의 경우나 네덜란드가 그 대표적인 예이며 대개 이들 나라의 방법을 사용시 낮은 일일섭취량이 추산된다. 또한 평균치와 중앙치사이에는 평균치가 일반적으로 다이옥신류의 식품섭취량을 과대평가하는 경향이 있는 것으로 알려져 있다.

이밖에도 엄밀한 의미의 Total Dietary Study는 아니었으나 최근 조사에서 스페인의 경우 마드리드를 대상으로 한 결과 다이옥신류는 60 kg의 성인을 대상으로 평균섭취량이 142 pg I-TEQ/인/일 (2.4 pg I-TEQ/kg-체중/일)이었고, non-ortho PCB류 (PCB #77 and PCB #169)는 130 pg TEQ/인/일 (2.2 pg TEQ/kg-체중/일)이었다.

이태리에서는 PCB류의 평균 섭취량을 223 ng PCB/kg-지방으로 추정하고 있으며 (1995년), 이때 섭취한 식품은 수분 5.8%, 단백질 18.8%, 지질 16.5%, 용해성 탄수화물 15.4%, 전분 34.3%, 재 4.4% 및 섬유질 4.8%이었고 총 추출가능한 지방성분은 15.25%이었다.

미국의 경우 PCB류의 섭취량을 약 1 pg TEQ/kg-체중/일 (65 kg 성인)로 추산하고 있으며, 이중에는 non-ortho 동족체도 포함하고 있다 (1996년).

표 2. 각국의 다이옥신류 및 PCB류의 식품섭취량 추정치

국 가	대 상	체중 (kg)	다이옥신류 섭취	PCB류 섭취
뉴질랜드				
(NME, 1998)	성인 남성 (25-44세)	80	14.5 pg I-TEQ/인/일 (0.18 pg I-TEQ/kg-체중/일)	12.2 pg TEQ/kg-체중/일 (0.15 pg TEQ/kg-체중/일)
	청년 남성 (15-18세)	70	30.6 pg I-TEQ/인/일 (0.44 pg I-TEQ/kg-체중/일)	22.7 pg TEQ/kg-체중/일 (0.32 pg TEQ/kg-체중/일)
카나다				
(Birmingham 등, 1989a)	평 균	60	139.7 pg I-TEQ/인/일	
(Newsome 등., 1998)		60		0.11 pg/kg-체중/일
독 일				
(Beck 등, 1992)	평 균		130 pg I-TEQ/인/일	
네덜란드				
(Liem과 Theelen, 1997)	중간치 성인		65 pg I-TEQ/인/일 (1.1 pg I-TEQ/kg-체중/일)	70 pg TEQ/인/일 (1.2 pg TEQ/kg-체중/일)
	95%백분위수 성인		159 pg I-TEQ/인/일 (3.1 pg I-TEQ/kg-체중/일)	183 pg TEQ/인/일 (3.6 pg TEQ/kg-체중/일)
영 국				
(UK MAFF, 1997a)	평균성인	60	90 pg I-TEQ/인/일 (1.5 pg I-TEQ/kg-체중/일)	54 pg TEQ/인/일 (0.9 pg TEQ/kg-체중/일)
	97.5%백분위수 성인		156 pg I-TEQ/인/일 (2.6 pg I-TEQ/kg-체중/일)	102 pg TEQ/인/일 (1.7 pg TEQ/kg-체중/일)
미 국				
(Schechter 등, 1994)	15-19세 남성	67	30-737 pg I-TEQ/인/일 (0.4-11 pg I-TEQ/kg-체중/일)	
	>20세 남성	70	19-553 pg I-TEQ/인/일 (0.3-8pg I-TEQ/kg-체중/일)	
	평균 성인	65	18-192 pg I-TEQ/인/일 (0.3-3.0 pg I-TEQ/kg-체중/일)	
(Schechter 등, 1996)	평균 성인	65		65 pg TEQ/인/일 (1.0 pg TEQ/kg-체중/일)
일 본				
(일본 환경청, 1997)	평균 성인	50	13-163 pg I-TEQ/인/일 (0.26-3.26 pg I-TEQ/kg-체중/일)	
(일본 후생성, 1997)	평균 성인	50	22-37.5 pg I-TEQ/인/일 (0.44-0.75 pg I-TEQ/kg-체중/일)	
(일본 후생성, 1997)	평균 성인	50	30-69.5 pg I-TEQ/인/일 (0.60-1.39 pg I-TEQ/kg-체중/일)	38.5-89.5 pg I-TEQ/인/일 (0.77-1.79 pg I-TEQ/kg-체중/일)

80년대 이후에 다이옥신류 배출을 저감시키는 정책을 수행한 국가에의 최근 연구결과를 살펴보면 식품중 다이옥신류와 PCB류가 감소하여 결국 지난 7년동안 약 2배정도 이들 물질에 대한 음식섭취량이 감소함을 명백하게 알 수 있다.

모유를 먹는 유아는 성인과 비교하여 다이옥신류 및 PCB의 일일섭취량에 있어 수십에서 수백배 높다. 최근 국제보건기구 (WHO)의 현장실험에서는 모유중 다이옥신류 및 PCB의 농도가 산업화 지역에서 높고 (10-35 pg I-TEQ/g-유지방), 개발도상국에서는 낮았다 (<10 pg I-TEQ/g-유지방). 또한 1988년과 1993년 사이에 모유의 다이옥신류 농도가 크게 감소하고 있다는 것을 보여 주었다.

1990년에 JECFA 는 총 PCB류의 일일 식품섭취량이 0.005~0.2 $\mu\text{g}/\text{kg}$ -체중 정도 일 것으로 예측하고 있다.

PCB류 (특히 non-ortho 동족체)에 대한 식품섭취량에 대해서는 최근에 들어서야 조사가 시작되었으며 다이옥신류에 비해 정보가 크게 부족하다. 분석방법이 다르고 과거에 분석된 PCB류의 동족체가 다르기 때문에 국가간의 직접적인 비교는 사실상 어렵다. 특히 non-ortho계 동족체가 다이옥신류와 유사한 독성을 나타내고는 있으나 이들 물질의 분석이 이루어진 연구는 최근에 들어서이다.

마지막으로 위의 과정에 대한 이해를 높이기 위해 여러나라의 다이옥신류 섭취에 관한 조사중 가장 최근에 실시된 이웃나라 일본의 다이옥신류 섭취수준을 식품과 환경으로 나누어 그림 2에 나타내었다.

4. 식품섭취에 따른 폭로에 대한 위해성평가

다이옥신류의 식품섭취에 따른 폭로시 인간건강에 미칠 수 있는 위해성은 다이옥신류에 대한 독성학적인 평가, 식품섭취패턴 및 식품중 농도 등에 관련된 정보를 조합하여 위해성의 형태나 크기를 평가하여

야 한다. 다이옥신류와 PCB류에 대한 식품섭취에 의한 폭로의 위해성 평가과정에서 필요한 각종 요소들을 정하기 위한 많은 정보들이 제공되고 있다.

이렇게 제공된 많은 정보를 토대로 위해성을 평가하고, 이들 위해도를 이해하기 쉬운 형태로 표현한 것이 TDI이다. TDI는 일일허용섭취량 (Tolerable Daily Intake)의 약자로 건강영향의 관점에서 하루당 생애에 걸쳐 연속하여 섭취하더라도 견딜수 있는 량을 의미한다. 농약이나 첨가물같이 의도적으로 사용되는 것이 아니고 비의도적으로 생산되어 환경유래로 인간의 체내에 받아들이는 물질에는 종래부터 쓰이고 있는 유사개념의 ADI (Acceptable Daily Intake)가 사용되었는데 이를 대신하여 최근에는 TDI를 쓰는 것이 국제적인 추세이다. 나라에 따라 TDI 대신 이것을 1주간 단위로 나타낸 일주허용섭취량 (Tolerable Weekly Intake)을 이용하기도 있다. 일일허용섭취량은 문구상 과거 ADI에 더 가까운 용어이며, 일본에서는 一日耐容攝取量이라 하는데 이 표현이 의미상 더 합당할 것으로 생각되나 본 글에서는 다른 원고들과 혼돈을 피하기 위하여 TDI이란 용어를 일일허용섭취량으로 서술한다.

다이옥신류 및 이와 유사한 물질에 대한 몇차례의 건강위해성평가분야의 WHO회합이 있었다. 1990년 회합에서는 TCDD에 대한 TDI를 10 pg/kg-체중/일로 설정하였다. 이때는 간독성 (liver toxicity), 생식독성 (reproductive effects) 및 면역독성 (immunotoxicity)을 기초로 하였으며 인간과 실험동물의 kinetic data를 사용하였다. 이 회합 이후 새로운 역학 및 독성자료가 나타나고 특히 신경발육 및 내분비작용 (환경호르몬)에 관한 자료가 고려되었다.

이에 1998년 회합에서는 WHO-ECEH와 IPCS가 모든 유용한 정보를 기초로 하여 재평가를 하였고, 이때 다이옥신류와 PCB류를 함께 고려하였다. 이 회합에서 다이옥신류 및 이와 유사한 PCB류에 대해 TDI를 1-4 pg TEQ/kg-체중/일로 정하였다.

식품

(일본 후생성 1998년 식품중 다이옥신류 오염실태조사)

식품군	1일당 식품섭취량 (국민영양조사) A (g)	식품중 다이옥신류 농도 B (pg/g)	다이옥신류 섭취량 C (pg)	제품 1kg 당 다이옥신류 1일 섭취량 (pg/g)
어패류	97.0	0.776	75.28	1.506
고기·계란류	120.0	0.174	20.87	0.417
우유·유제품	133.9	0.070	9.42	0.188
유색야채	98.9	0.050	4.94	0.099
잡곡	166.2	0.025	4.21	0.084
기호품	182.4	0.007	1.31	0.026
야채·해초	205.0	0.006	1.23	0.025
쌀	166.5	0.007	1.18	0.024
설탕·과자	34.2	0.020	0.70	0.014
유지	16.9	0.031	0.53	0.011
가공식품	5.5	0.073	0.40	0.008
콩·콩가공품	72.3	0.006	0.40	0.008
과실	118.6	0.002	0.21	0.004
음료수	600.0	0.00003	0.02	0.0004
합계	2,017.4		120.7	2.41

환경

대기	· 대기농도 : 0.55 pg-TEQ/m ³ (1998년 지방공공단체등 Monitoring에 있어서의 유해대기오염물질조사결과) · 1일호흡량 : 15 m ³	0.17
토양	· 토양농도 : 22 pg-TEQ/g (1998년 다이옥신류의 pilot 종합조사결과) · 토양의 1일당 경구섭취량 어린이/성인 = (150/50)~(200/100) mg/일 · 토양으로부터의 경피 및 경구 폭로도 고려	0.0024~0.021
		0.19

다이옥신류의
1인1일섭취량
2.60 pg/kg

그림 2. 일본의 다이옥신류 1인 1일 섭취량

이 전문가회합에서는 동물실험에서 낮은 농도에서도 영향을 나타내는 가장 민감한 효과들 (환경호르몬 작용 등)에 초점이 맞추어졌다. 이들 효과는 rat과 monkey에서 10~50 ng/kg-체중에서 발현되었다. 동물에서 나타난 이들 효과에 대해 체중을 고려한 인간의 일일섭취량을 10~40 pg/kg-체중/일로 추산하였으며, 종에 따른 체중변화를 감안하여 종간의 차이에 기인된 불확실성계수 (uncertainty factor)를 고려하기로 결론을 내렸다. 이때 추산된 인간의 섭취량은 무독성량 [No Observed Adverse Effect Level (NOAELs)]이 아닌 최소독성량 [Lowest Observed adverse Effect Level (LOAELs)]에 기초하였다. 비록 많은 인자에 의해 인간이 동물에 비해 덜 민감하다고 알려져 있지만 동물과 인간의 민감도 부분에도 불확실성이 있다. 더욱이 TEQ 혼합물의 서로 다른 물질에 대한 반감기에는 차이가 존재한다. 이러한 불확실성을 고려하여 복합적인 불확실성계수로서 10이 권고되었다.

WHO전문가회합에서는 이러한 민감한 효과를 일으킬 수 있는 정도의 폭로가 이미 산업화된 국가의

일반국민에게서 일어나고 있다고 인식하였고, 권고된 1~4 pg TEQs/kg-체중/일을 유지하기 위해서는 더 많은 노력이 이루어져야 한다고 권고하고 있다.

몇몇 국가에서는 과거 WHO의 재평가이전의 TCDD에 대한 일일허용섭취량으로서 1~10 pg TCDD/kg-체중을 설정하고 있고, 다이옥신류의 오염이 큰 사회문제가 되고 있는 일본에서는 1999년 6월에 TDI로서 4 pg TEQ/kg-체중을 설정하였다.

또한 몇몇 주요 연구기관에서는 TCDD의 장기폭로시 암컷쥐에서 발견된 간종양자료를 Linear Multistage Model에 적용하여 safe dose를 계산하고 있다. 미국 환경보호청은 lowest safe dose를 0.006 pg TCDD/kg-체중/일로 계산하였으며 이때 acceptable lifetime tumour risk를 10⁻⁶으로 가정하였다. 현재 이러한 다이옥신에 대한 위해성평가가 EPA에 의해 재평가 중이다.

이러한 TDI를 기본으로 각국에서 정하고 있는 다이옥신류에 대한 TDI와 식품기준 및 기타 건강관련 가이드라인을 요약하여 표 3에 나타내었다.

표 3. 각국의 다이옥신류에 대한 식품기준, TDI 및 기타 건강관련 가이드라인

국가/기관	허 용 치	비 고	참고문헌
캐나다	10 pg I-TEQ/kg-체중/일	TDI	Government of Canada (1990)
	어류: · 20 ng I-TEQ/kg-습윤체중	허용농도	Gilman 등 (1995)
독 일	1-10 pg I-TEQ/kg-체중/일	TDI	Appel 등 (1994)
	1 pg I-TEQ/kg-체중/일	장기목표	Toxicology Forum (1992)
	우유 및 유제품: · 5 ng I-TEQ/kg-지방 · 3 ng I-TEQ/kg-지방 · 0.9 ng I-TEQ/kg-지방	기준초과시 유통금지 기준초과시 발생원 억제대책 시행 바람직한 목표치 (제안)	Bericht der Bund/ Lander- Arbeitsgruppe DIOXIN (1993)
일 본	10 pg TEQ/kg-체중/일	TDI (후생성에서 설정)	일본 후생성 (1997)
	5 pg TEQ/kg-체중/일	건강위해성평가치 (환경청에서 설정)	일본 환경청 (1997)
	4 pg TEQ/kg-체중/일	TDI (후생성, 환경청 공동설정)	일본 후생성, 환경청 (1999)

국가/기관	허용치	비고	참고문헌
네덜란드	10 pg I-TEQ/kg-체중/일	2,3,7,8-TCDD에 대해 설정한 WHO TDI인 10 pg/kg-체중/일을 도입. 그러나 I-TEQ로 적용, TDI	Liem 과 van Zorge (1995)
	1 pg I-TEQ/kg-체중/일	인간폭로의 권고허용치	Health Council of the Netherlands (1996)
	우유 및 유제품: · 6 ng I-TEQ/kg-지방	기준초과시 관련 지역에 대책 시행	Theelen 등 (1993)
스웨덴	5 pg N-TEQ/kg-체중/일	TDI	Ahlborg 등 (1988) [cited in Liem and van Zorge, (1995)]
영국	10 pg I-TEQ/kg-체중/일	TDI (CoT에서는 PCB류도 포함시킨 권고)	WHO (1991), CoT (1997)
	우유 및 유제품: · 16.6 ng TEQ/kg-유지방	최고허용농도 (Maximum Tolerable Concentration) (기준초과시 관련 지역에 억제 대책 시행, PCB류도 포함)	Ministry of Agriculture, Fisheries and Food (1997b)
미국	1 pg I-TEQ/kg-체중/일	최소위해농도(Minimal Risk Level -Chronic (365 일) oral exposure)	ATSDR (1997)
	0.006 pg 2,3,7,8-TCDD/kg-체중/일	생애발암위해도에 기초한 위해수준 (Risk Specific Dose based on lifetime cancer risk)	US EPA (1994)
	어류: · 25 ng/kg-습윤체중	섭취허용치 (Limit value for consumption)	FDA [cited in US EPA (1987)]
WHO	10 pg/kg-체중/일	2,3,7,8-TCDD에 대한 권고 TDI	WHO (1991)
	1-4 pg TEQ/kg-체중/일	다이옥신류 및 PCB류에 대한 TDI 제안치 (WHO TEF로 계산) (Van den Berg et al., 1998)	WHO (1998)

* TDI (Tolerable Daily Intake) : 일일허용섭취량

5. 섭취에 의한 폭로의 위해성 관리

위에서 다이옥신류 등에 대한 위해성 평가와 관련된 정보를 서술하였다. 이들 정보에 기초하여 몇몇 국가에서는 허용위해성수준으로 다이옥신류 등의 섭취에 의한 폭로 위해성을 저감 또는 제어하기 위하여 위해성 관리수단을 도입하고 있다.

위해성 관리수단은 사회적, 기술적 그리고 경제적 관리수단이 있다. 이를 위해서는 무엇보다도 위해성 평가 및 위해성관리의 관련 연구가 필수적이다. 위

해성평가의 주요 연구분야로서는 독성학, 역학, 발생수준평가 (모니터링 및 조사), 섭취예측 및 식품에 의한 폭로수준예측 등이 있다. 위해성관리에 대해서는 인간과 환경의 폭로정도를 모니터링하는 것이 중요하다. 아울러 환경과 식품의 오염을 방지하고 오염물질의 생산이나 배출을 감소시키기 위한 방법의 개발이 필요하다. 그러나 세계적으로도 국가규모의 다이옥신류에 대한 정보는 개발도상국에서는 상대적으로 부족한 실정이다.

또한 위해성관리수단은 크게 두가지 분야로 나누

어진다. 즉, 오염원관리와 이미 오염된 식품의 소비를 억제하는 방법이 있다. 여기서는 두가지 관리수단을 비록 유사한 물질이기는 하나 관련 정보의 많고 적음과 배출특성의 차이에 기인하여 다이옥신류와 PCB류로 나누어 기술하였다.

(1) 오염원 관리

1) 다이옥신류

폐기물소각시설에 의한 다이옥신류의 배출억제가 많은 국가에서 폭로를 줄이기 위한 가장 일반적인 방법이다. 이는 다이옥신류의 환경중 배출량이 폐기물소각시설에서 가장 높기 때문에 당연한 조치이며, 대개는 다이옥신류의 배출량이 높은 배출원부터 각종 조치가 시행되고 있다. 최근에는 대개의 유럽국가에서 모든 소각로를 대상으로 배출가스중 다이옥신류의 농도를 0.1 ng I-TEQ/m^3 로 규제하고 있다. 우리나라도 1997년부터 50톤/일 이상의 대형 쓰레기소각시설에 대해서는 같은 규제를 시행하고 있다. 독일이나 네덜란드에서는 환경적인 요구에 부응하지 못하는 소각시설은 전면 폐쇄시키고 있으며, 최근까지 계속되고 있는 유럽연합의 규제 때문에 유럽에서의 다이옥신류 배출은 크게 감소하고 있다. 또한 과거 목재방부제로 널리 사용되었던 다이옥신류를 포함하고 소각시설에서 다이옥신류의 생성 전구물질로 알려진 펜타클로로페놀 (pentachlorophenol, PCP)의 사용을 금지시키고, 종이의 표백과 관련된 조치도 폭로를 감소시키는 주요한 수단이 되고 있다.

네덜란드에서는 1990년에 전체 다이옥신류 배출량의 80%가 폐기물소각시설에서 기인하였다고 보고되었다. 주요 다이옥신류 배출경로는 대기였으며 (약 600 g I-TEQ/년), 수질과 토양으로는 약 7 g I-TEQ/년 이었다. 다이옥신류의 강하는 식품오염에 매우 중요하며 그 양은 $2\sim 25 \text{ ng I-TEQ/m}^2/\text{년}$ 인 것으로 추정하고 있다. 또한 대기중 강하에 의한 다이옥신류의 오염중 35% 이상이 다른 나라의 오염원로부터

터 야기된 것이었다. 즉 이러한 상대적인 기여도는 네덜란드내에서의 다이옥신류 배출억제수단으로 인해 오히려 증가하게 되어 국경간의 분쟁의 소지도 있게 된다. 그러나 이러한 영향을 정확하게 파악하기 위해서는 다른 주변 산업화 국가에서 다이옥신류의 배출에 대한 정보가 파악되어야 한다.

이러한 소각시설에 대한 다이옥신류 규제조치로 인해 1991년에 네덜란드에서 다이옥신류의 총 배출량은 1988년과 비교하여 50%가 감소하였고, 1998년에는 1991년과 비교하여 88% (다이옥신류와 PCB류에 대해서는 87%)가 감소하였다. 2000년에는 1998년과 비교하여 약 3%의 다이옥신류 배출량이 감소할 것으로 예측하고 있다.

이외에도 현재는 선진국을 중심으로 금속공업, 특히 구리소결로와 금속회수시설에서 다이옥신류 배출을 저감시키기 위한 기술적 수단의 검토와 이들 시설에서 도시쓰레기 소각시설의 배출가스 기준치인 $0.1 \text{ ng I-TEQ/Nm}^3$ 의 적용 가능성, 할로겐화 플라스틱의 사용제한, 지역별 건강강화면지에 대한 지침치 설정 등을 진행시키고 있다.

이들 나라에서 이러한 조치 수단의 효과를 평가하기 위해서는 다이옥신류에 대한 환경폭로를 모니터링하고 확인하는 프로그램이 필수적인 것으로 인식하고 있다.

2) PCB류 (Polychlorinated biphenyls)

환경중 PCB류에 의한 오염을 저감시킨 가장 중요한 법적 수단으로는 우리나라를 포함한 전세계적으로 1970년대초 개방형시스템에서의 PCB류 사용금지 및 1980년대초 새로운 장비에서의 PCB류를 사용금지시킨 OECD의 금지규정이었다. OECD가 PCB류를 금지시켰기 때문에 많은 국가에서 PCB류 농도는 감소하고 있다. 어류 등에서 PCB류 오염문제가 발생하였던 스칸디나비아 반도의 국가에서도 감소경향이 확인되고 있으며, 미국 등 전 세계적으로 PCB류 농도는 크게 감소하고 있다. PCB류 폭로 모니터링 프로그램도 현재 몇몇 국가에서 운영중에 있다.

(2) 식품 생산과 식품섭취와 관련된 수단

많은 나라에서 임신 또는 수유모를 겨냥하여 소비자 정보나 조언을 하고 있다. 일반적으로 임신모에 대해서는 다이옥신류 등이 상대적으로 많이 함유되어 있는 식품의 빈번한 섭취를 피하도록 조언하고 있다. 추가적으로 수유모의 식품섭취는 다이옥신류 등이 식품섭취중에는 모유중에서 증가하지 않기 때문에 권고하지 않고 있는 실정이다.

1) 다이옥신류

보건당국과 표백종이제품회사의 다이옥신류 저감 노력에 의해 표백종이제품으로부터 우유 등 식품으로의 다이옥신류의 이행과 포장재로부터의 평균 일일섭취량은 크게 줄어들고 있다.

몇몇 국가에서는 다이옥신류 등의 섭취를 줄이기 위한 오염원 대책이외에도 직접적으로 섭취량과 밀접한 관련이 있는 식품의 품질기준을 설정하고 있다. 네덜란드에서는 우유에 대한 식품품질기준으로서 6 pg I-TEQ/g-지방을 설정하고 있고, 독일과 영국에서는 다이옥신류에 대해 각각 5 pg I-TEQ/g-우유지방과 17.5 pg I-TEQ/g-우유지방 (0.7 ng I-TEQ/kg-우유)을 대책발동기준으로 정하고 있다.

1989년에 네덜란드에서는 폐기물소각시설로부터의 다이옥신류 배출에 기인된 지역적인 우유의 오염으로 인해 몇몇 법적 조치를 취한 바 있다. 예를 들어 폐기물소각시설 근방 2000에이커 지역에 농가로 부터 생산되는 우유의 판매를 금지시키고, 관련 유제품이나 우유지방의 생산을 금지시켰으며, 오염지역외부로 목초의 이송을 금지시켰다. 소, 양 등의 귀에 표기를 하도록 하고 육류의 소비가 적합한가를 승인받도록 하였다. 대신 네덜란드 정부는 관련 주민에게 경제적인 보상을 실시하였다. 이러한 효율적인 오염원 대책에 의해 1994년에는 이 지역의 우유 중 다이옥신류의 농도는 배경농도만큼 감소하였다. 보다 자세한 내용은 표 2를 참고하기 바란다.

2) PCB류 (Polychlorinated biphenyls)

몇몇 국가에서는 식품중 PCB에 대한 법적 최고농

도를 설정하여 놓고 있다. 이 최고농도는 표현방식에 따라 농도가 다르다 (즉, 총 PCB류 또는 개별 동족체 농도). 네덜란드에서는 일부 PCB 동족체에 대해 우유, 어류제품, 육류 및 계란을 대상으로 0.5~1 mg 총 PCB/kg-지방의 기준을 설정하고 있다. 독일에서도 유사한 최고허용기준이 설정되어 있다. 스웨덴의 국립식품국 (Swedish National Food Administration)에서는 최근 육가공제품, 우유 및 유제품, 계란과 어류제품에서 PCB류의 최고허용농도의 개정안이 상정되어 있다.

(3) 식품중 다이옥신류와 PCB류의 위해 특성

17종의 다이옥신류와 다이옥신 유사 PCB의 총 섭취량이 산업화국가에서 1998년 국제보건기구에서 제안한 일일허용섭취량 (TDI) 1~4 pg TEQ/kg-체중보다 높은 2~6 pg TEQ/kg-체중이 현재 섭취되고 있다는 사실은 제도적으로 다이옥신류를 비교적 잘 관리하고 있다고 할 수 있는 선진국에서도 보다 위해성을 저감시키고자 하는 노력이 필요하다는 것을 알 수 있다.

또한 이러한 수치비교는 단순히 평균적인 개념에서 실시된 것이며 다음과 같은 다이옥신류 등의 위해 특성을 고려하여 보다 면밀히 검토되어야 할 것으로 국제사회에서 제안되고 있다.

- 지역적 배출: 위에서는 평균적인 일일섭취량을 사용하였으나 실제 소비자의 섭취패턴에 따라 이 평균 일일섭취량은 크게 증가할 수 있다. 이러한 변화는 특정한 식품의 섭취를 선호하는 데서 비롯되며 이에 따라 지역적으로 오염가능성이 높은 식품을 섭취하는데 특별한 관심을 기울여야 한다.
- 섭취패턴: 동물계 식품이 다이옥신류와 PCB류를 포함한 식품의 섭취에 크게 기여하게 되므로 이러한 식품의 섭취가 많은 경우는 일일섭취량이 증가하게 된다. 이는 특히 간과 같은

식품을 많이 섭취하는 경우 다이옥신류 등이 상대적으로 많이 포함되어 있어 더욱 그러하다. 또한 어류의 경우도 마찬가지이다.

- 연령에 따른 섭취: 일반적으로 어린이는 체중이 적게 나가기 때문에 상대적으로 많은 양을 섭취할 수 있다. 네덜란드에서는 다이옥신류의 일일섭취량의 중간치가 3~4 pg I-TEQ/kg-최고체중에 이를 것으로 계산하고 있고 다이옥신류와 유사 PCB류까지 고려하면 중간 일일 섭취량으로 최고 6~8 pg I-TEQ/kg-체중에 이를 것으로 계산하고 있다.
- 모유섭취: 상대적으로 높은 양의 다이옥신류 등이 유아에게 모유를 먹이는 동안 섭취될 수 있음이 보고되고 있다. 모유의 농도와 지속시간 등이 폭로에 관여하게 된다. 유아에게 모유를 통한 다이옥신류의 섭취는 60~200 pg I-TEQ/kg-체중으로 추산되고 있으며, 이때 모유중 다이옥신류의 농도는 평균 16~40 pg I-TEQ/g-지방으로 예측되고 있다. 코프라나-PCB류의 섭취는 같은 수준을 나타내는데 이는 모유중 다이옥신류와 같은 정도의 TEQ값을 나타내기 때문이다.
- TDI개념은 평생 섭취를 기본으로 하기 때문에 모유에 의한 유아시기의 위해 특성을 위해 이 개념을 도입하는 것은 어렵다. 1990년에 JECFA는 평생동안 단지 짧은 기간중 소비되는 모유에 의한 건강상 악영향이나 PCB 등의 잠재적 위험성보다 모유자체의 다른 이득이 더 많이 있는 것으로 결론내리고 있다. 다이옥신류에 관해서는 1990년에 국제보건기구가 모유중 다이옥신류의 농도로는 유아에게 관련된 건강상 악영향이 없을 것으로 결론내리기도 하였다.

6. 결론 및 권고

다이옥신류 등에 포함된 식품섭취의 위해성평가와

위해성관리에 대한 정보는 아직까지도 매우 부족하다. 위해성평가와 관련된 정보의 차이와 불확실성이 외에도 기술적, 사회적 및 경제적 고려요소에 대한 정보가 부족한 실정이다. 이러한 현실은 위해성관리를 위한 결정과정을 어렵게 만들고 있다.

그러나 지금까지 국제적으로 어느 정도 인정받고 있는 가치있는 결론과 권고사항을 다음에 나타내었다.

- 다이옥신류와 다이옥신유사 PCB류가 유사한 영향을 나타내고는 있지만 다이옥신류나 PCB류의 다양한 독성의 기전은 충분히 해명되고 있지 않다. 추가적인 연구와 전문가의 판단이 이러한 기전을 명확히 하는데 기여할 수 있을 것이다. 이러한 불확실성에도 불구하고 용량-반응곡선의 형태적인 차이나 종에 따른 반응성의 차이에 의해 TEF개념은 아직까지 유용할 것으로 판단되며 다이옥신류 등에 대한 폭로의 위해성평가나 위해성관리에 이용가능할 것이다.
- 최근의 역학 및 독성학적 자료에 근거하면 다이옥신류 등이 이전에 가정했던 것보다 더욱 넓은 범위에서 건강상 영향을 줄 수 있다는 것을 보여준다. 이것은 지속적으로 이들 물질에 대한 위해성 확인작업이 진행되어야 한다는 것을 의미한다. 다이옥신류와 PCB류 둘다 식품을 통해 잠재적인 인체영향을 줄 수 있다는 증거는 충분하며, 평균적인 폭로는 이미 TDI와 같은 수준에 와 있다. 이것은 평균적인 식품의 섭취이상으로 다이옥신류 등을 섭취할 경우 문제를 일으킬 수 있다는 것을 의미한다.
- 다이옥신류 등에 대한 몇몇 국가에서 설정한 식품품질기준 (food quality standard)은 서로 상이하다. 다이옥신류 오염과 관련하여 낙농 또는 육가공제품에 대한 판매행위는 소비이전에 안정성이 확인되기 전까지 금지되어야 한다. 더욱이 다이옥신류에 오염된 식품이나 사

료도 확인절차에 따라 거부될 수 있어야 하며 이로 인해 국가간에 재정, 무역 및 보안문제를 야기시킬 수 있다 (실제 이번 벨기에 다이옥신 오염사고가 좋은 예). PCB류와 관련되서는 이미 식품오염에 의한 국제무역상 제한된 사례가 있다.

- 그러므로 건강상 또는 무역상 이유에서 식품중 다이옥신류 등을 저감시키기 위하여 위해성 관리수단의 도입이 필수적이며, 국제간 이동되는 식품에 대하여 기준이 설정되어야 한다. 국제적으로는 이미 식품첨가제나 오염물질에 대한 기준 및 규격설정이 가시화되고 있다.
- 다양한 위해성 관리수단에 의해 다이옥신류와 PCB류의 식품중 함량을 줄일 수 있다. 다이옥신류 등은 환경중 잔류성이 높기 때문에 계속적인 배출에 의해 농도가 증가하는 경향이 있다. 그러므로 배출원에서의 직접적인 제어수단이 요구된다.
- 식품중 다이옥신류 등의 농도를 낮추기 위해서는 식품의 생산, 가공, 이송 및 포장시에 적용될 수 있는 기술개발이 필요하다. 또한 행동강령이나 품질관리프로그램의 개발도 실제적으로 식품중 오염물질 농도를 줄이는데 기여한다. 식품섭취에 의한 폭로나 PCB중의 다이옥신류

농도의 경향에 대해 법적 모니터링과 그 제어수단의 효과를 평가하는 것이 중요하다. 이것은 이번 벨기에 오염사고에서 처럼 PCB류와 다이옥신류의 상관관계를 밝혀 상대적으로 분석기술 및 분석시간을 줄일 수 있는 PCB류의 측정을 의무화함으로써 대체수단으로서 이용할 수 있다.

- 기타 향후에 국제적으로나 지역적으로 확립되어야 할 항목은 다음과 같다.
 - 국제적인 교역을 통해 일반적으로 유통되는 식품의 종류
 - 다이옥신류 등에 대한 분석방법
 - 오염물질의 식품별 섭취비율
 - 평균 섭취패턴과 지역적, 문화적 편차
 - 식품의 생산, 취급 및 소비와 관련된 다이옥신류의 식품오염 발생원
 - 식품중 다이옥신류 등의 최고농도, 가이드라인 농도, 대책발동농도와 이들 기준의 기본 가정
 - 환경중 이들의 오염을 억제하기 위해 시행된 위해성관리수단에 대한 조사
 - 오염과 위해성관리수단의 기술적, 사회적 및 경제적 결과