

환경매체에서의 다이옥신 노출과 위해성 평가

연세대 보건대학원 양지연

1872년 독일의 화학자가 다이옥신을 처음 합성한 이후, 1960년대의 월남전에서의 제초제 대량살포 사건, 1968년 일본과 1979년 대만에서의 쌀겨기름사건 등을 통해 다이옥신에 대한 독성 연구가 시작되었다. 1970년대에서 80년대에 걸쳐 이태리 세베소(Seveso) 사건, 러브커넬(Love Canal) 사건, 테임즈비치(Thames Beach) 사고 등 세계 각지의 화학공장에서 사고나 폐기물 매립처분에 따른 다이옥신류에 의한 오염 사고가 발생하면서 생태계 및 인체 유해 영향 문제가 제기되었다. 또한 1977년 Olie 등이 폐기물 소각로의 비산재에서 다이옥신이 함유된다고 밝힌 이후, 각종 연소시설로부터 다이옥신이 배출되고 있다는 것이 확인되면서 이에 대한 규제와 대책마련에 관심이 집중되고 있다.

다이옥신은 지용성 물질로서 먼지, 재, 토양 등에 쉽게 흡착되며, 한번 흡착되면 쉽게 분리되지 않고, 자외선 같은 빛에 대해서도 매우 안정된 구조를 유지하는 특성을 가지고 있다. 이러한 화학적 성질 때문에 먹이사슬로의 침투가 쉽게 이루어지고 궁극적으로 인체에 지속적인 축적을 야기하게 된다. 인체의 경우 지방조직 및 간 등에 축적되며, 그 반감기는 약 5~7년 정도이다.

다이옥신은 세포내 단백질에 결합하여 핵에 침투한 후 유전자(DNA) 변형을 일으켜 인체에 다양한 독성을 유발하는 것으로 추정한다. 현재 다이옥신은 동물실험을 통해 발암성이 입증되었고, 제한적이기는 하나 역학연구 등을 통해 인체에서도 발암 가능성이 인정되어 국제암연구기구에서 1997년 발암물질로 공포한 바 있다. 미국 환경보호청(US EPA)에서도 2,3,7,8-tetrachlorinated dibenzo-p-dioxin (2,3,7,8-TCDD)은 인체 발암물질(human carcinogen), 다이옥신류는 유력한 인체 발암 물질(likely human carcinogen)로 분류하고 있다.

산업화를 주도해왔던 미국이나 유럽의 일부 국가들에서는 1980년대부터 다이옥신의 인체 축적성 및 부하량을 평가하기 위해 인체 조직에서의 농도를 측정하기 시작하였으며, 다양한 환경 매체 및 식품 중 농도를 조사하여 일반인들의 일일 노출 수준을 평가하였다. 국내에서도 1990년대 말 환경호르몬에 대한 관심이 급증하면서, 다이옥신에 대한 연구가 진행되기 시작하였으며, 2000년대 이후 환경 및 식품, 인체 조직에서의 다이옥신 분석 결과가 연구·발표되고 있다.

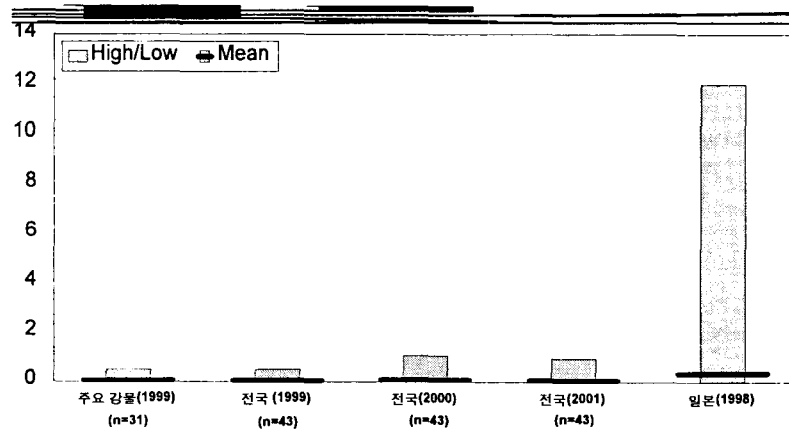
본 원고에서는 국내 대기, 수질 및 토양 등의 다양한 환경 매체와 식품에서의 다이옥신 오염 수준을 살펴보고, 이를 바탕으로 일반 성인의 일일 인체 노출량을 예측하며, 인체 조직에서의 다이옥신 농도를 바탕으로 국내 성인의 인체 부하량을 평가함으로써, 국내에서의 다이옥신으로 인한 인체 위해성을 살펴보았다.

(1) 국내 환경 중 다이옥신 오염도 수준

국내 수계, 대기, 토양 및 저질 등의 환경 매체에서의 다이옥신 오염도를 평가하기 위해 연구 보고서, 국내외 학술지에 발표된 논문을 중심으로 다이옥신 측정, 평가 자료를 수집하였다. 수집된 자료 중 측정 지점, 측정 시기, 측정 방법 및 QA/QC 자료, 측정 단위가 정확하게 제시되어 있는 자료만을 선별하여 인용, 평가하였다.

다이옥신은 배출 가스를 통한 대기 배출원이 주요 오염원이며, 지용성 물질이기 때문에 수질 오염에 의한 다이옥신 문제는 중요하지 않은 것으로 평가되어 왔다. 이로 인해 국내 수질 중 다이옥신 오염도는 주요 하천을 중심으로 한 수계 측정 자료만 조사되었다.

국내 수계 중 다이옥신 오염도는 1 pg-TEQ/ℓ 이하의 수준으로 조사되었으며, 평균 오염도는 일본의 수계 평균 오염도(0.36 pg-TEQ/ℓ)에 비해 1/10배 수준인 것으로 평가되었다(그림 1).



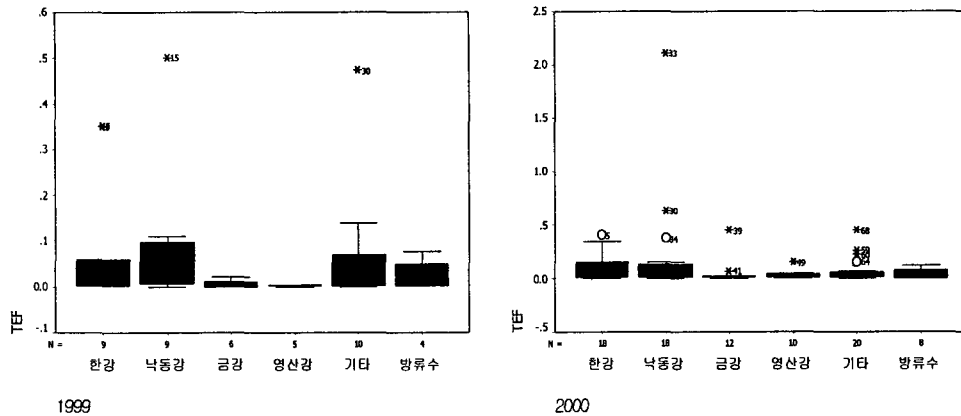
참고문헌 : 김기호 등(2001), 국립환경연구원(2000-2002)

그림 1. 국내 수계에서의 다이옥신 오염도 비교

그림 2는 환경 중 다이옥신 잔류 실태 조사 연구 보고서(국립환경연구원, 2000, 2001)에 제시된 전국의 주요 수계 43 지점에 대한 다이옥신 오염도를 한강, 낙동강, 금강, 영산강, 기타 수계(만경강, 삼교천, 태화강, 남대천, 섬진강, 오십천, 안성천 및 경안천)와 방류수 배출 지점(중량천 하수종말처리장, 부산 남부 하수처리장, 광주 하수종말처리장, 용인 하수종말처리장)으로 분류하여 비교하였다. 그 결과 1999년의 낙동강의 다이옥신 오염농도가 같은 해 다른 수계에 비해 다소 높은 것으로 나타났으며, 방류수에서의 다이옥신 오염도는 하천수나 호소수와 큰 차이가 없는 것으로

평가되었다. 그러나, 금년에 발표된 환경 중 다이옥신 잔류 실태 조사 연구 보고서(국립환경연구원, 2002)에 의하면, 하천수는 평균 0.055 pg-TEQ/ℓ (0.001~0.389 pg-TEQ/ℓ), 호소수는 0.012 pg-TEQ/ℓ (불검출~0.044 pg-TEQ/ℓ)인 반면 방류수는 0.298 pg-TEQ/ℓ (0.004~0.946 pg-TEQ/ℓ)으로 방류수에서의 오염도가 지난해에 비해 증가된 것으로 나타났다.

국내 수계에서의 오염도는 일본의 일반 수질환경기준 1 pg-TEQ/ℓ 또는 펄프제지, 폐기물 소각장 등에서 배출되는 폐수처리시설의 배출허용기준 10 pg-TEQ/ℓ에 비해 낮은 오염도를 보이고 있었다.



참고문헌 : 국립환경연구원(2000-2001)

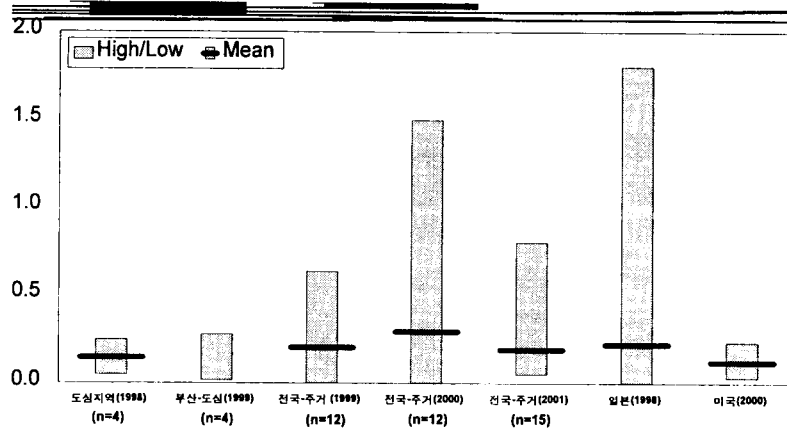
그림 2. 국내 수계의 주요 하천별 다이옥신 농도 비교

국내 대기 중 다이옥신 오염도 조사 결과, 특별시 및 광역시 중심의 도심 지역은 평균 0.2 pg-TEQ/m³(0.015~0.274 pg-TEQ/m³) 수준으로 나타나 미국의 일반 대기 수준(0.12 pg-TEQ/m³)에 비해 다소 높고, 일본의 대기 오염 수준(0.22 pg-TEQ/m³)과는 유사한 것으로 평가되었다(그림 3).

그림 4에는 환경 중 다이옥신 잔류 실태 조사 연구 보고서(국립환경연구원, 2000, 2001)에 제시된 전국의 주요 도시 24 지점에 대한 다이옥신 오염도를 주거지역, 도로변, 공단지역으로 분류하여 비교하였다. 우리나라의 대기 중 다이옥신 오염도를 비교해 보면 1999년과 2000년 모두 공업단지 지역(1999년 평균 2.28 pg-TEQ/m³, 2000년 평균 0.074 pg-TEQ/m³)에서 다른 지역보다는 높은 오염도를 나타내었으며, 지점마다의 노출 변이도 큰 것을 알 수 있었다.

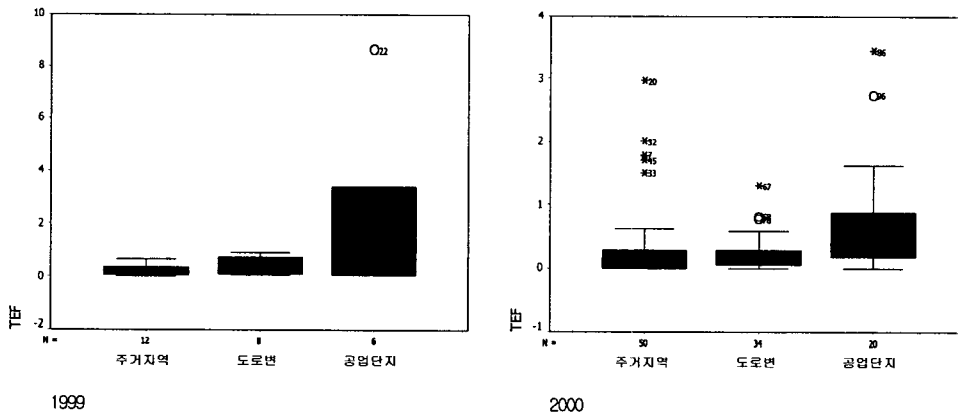
2002년 환경 중 다이옥신 잔류 실태 조사 연구 보고서(국립환경연구원, 2002)에서는 일부 공단지역에서의 대기 중 다이옥신 오염도가 0.537~1.664 pg-TEQ/m³로 조사되어, 공단 지역에서의 대기 중 오염도는 일본의 대기환경기준(0.6 pg-TEQ/m³)

을 초과하는 것으로 발표한 바 있다. 서울·부산 등 광역시급 이상 도시는 평균 0.190 pg-TEQ/m³(0.049~0.798 pg-TEQ/m³), 중소도시가 평균 0.558 pg-TEQ/m³(0.037~1.664 pg-TEQ/m³), 농어촌지역이 평균 0.052 pg-TEQ/m³(0.013~0.122 pg-TEQ/m³)으로 조사되었다. 중소도시의 대기 중 오염도가 높은 원인으로서는 다이옥신 배출원인 산업단지가 포함되어 있기 때문인 것으로 평가되었다.



참고문헌 : 연세대 환경공해연구소(1999), 옥곤 등(2001), 국립환경연구원(2000-2002)

그림 3. 국내 대기에서의 다이옥신 오염도 비교



참고문헌 : 국립환경연구원(2000-2001)

그림 4. 국내 주요 특성별 대기 중 다이옥신 농도 비교

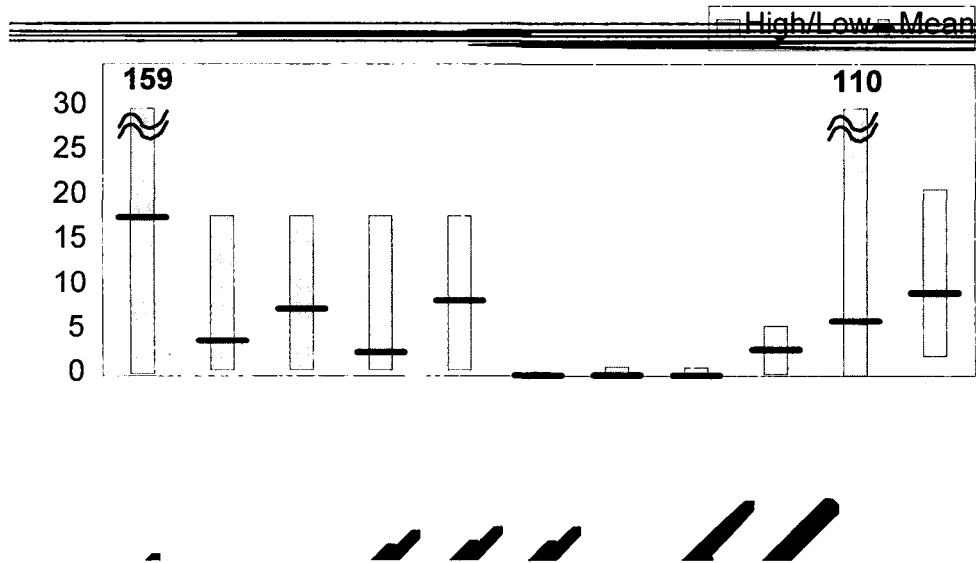
국내 토양 중 다이옥신 오염도 평가는 일부 생활 폐기물 소각 시설 주변 지역에서의 토양 중 오염도 조사 결과가 발표된 바 있으나, 다이옥신 오염원이 존재하지

않은 일반 토양에서의 오염도 측정 결과는 매우 적다.

국내 주요 지역 토양에서의 다이옥신류 조사 자료를 그림 5에 나타내었다. 공단 지역의 경우, 최고 159 pg-TEQ/g까지 측정되었으며, 공단 주변 주거 지역에서의 평균 오염도는 약 3 pg-TEQ/g 수준으로 나타나 다른 지역에 비해 다소 높은 것으로 조사되었다. 폐기물 소각장이 있는 지역에서는 0.173~5.62 pg-TEQ/g 수준이었고, 일반 지역에서는 2 pg-TEQ/g 이하의 수준으로 나타나, 일반 주거 지역의 토양 중 다이옥신 오염도는 일본과 미국에 비해 낮은 것으로 평가되었다.

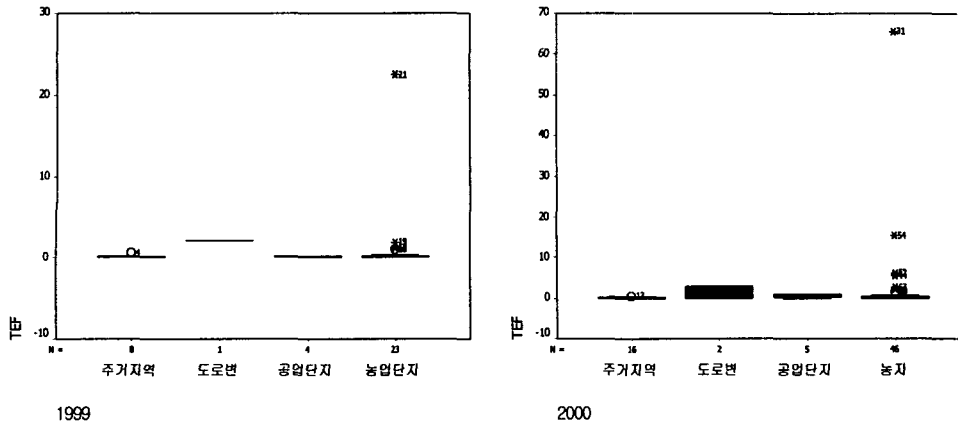
그림 6에는 환경 중 다이옥신 잔류 실태 조사 연구 보고서(국립환경연구원, 2000, 2001)에 제시된 전국의 주요 도시 35 지점에 대한 다이옥신 오염도를 주거지역, 도로변, 농지 및 공단지역으로 분류하여 비교하였다. 국내 토양 중 다이옥신 평균 오염도는 도로변에서 1999년과 2000년 모두 가장 높게 나타났으며, 농지의 경우에는 측정 지점에 따라 농도 변이가 매우 큰 것으로 평가되었다.

2002년 환경 중 다이옥신 잔류 실태 조사 연구(국립환경연구원)에서는 농업용지가 0~43.333 pg-TEQ/g(평균 2.266 pg-TEQ/g), 산업단지 등이 있는 공업용지가 0.017~0.601 pg-TEQ/g(평균 0.237 pg-TEQ/g), 체육, 공원 지역이 0.005~0.049 pg-TEQ/g(평균 0.021 pg-TEQ/g), 학교 등 기타지역이 0.008~1.825 pg-TEQ/g(평균 0.546 pg-TEQ/g)으로 조사되었다. 2002년 조사에서도 농경지의 경우에는 측정 지점에 따른 농도 변이가 큰 것으로 나타났다.



참고문헌 : 임숙현 등(2002), 김상조 등(2001), 김동기 등(2002), 국립환경연구원(2000-2002)

그림 5. 국내 토양에서의 다이옥신 오염도 비교

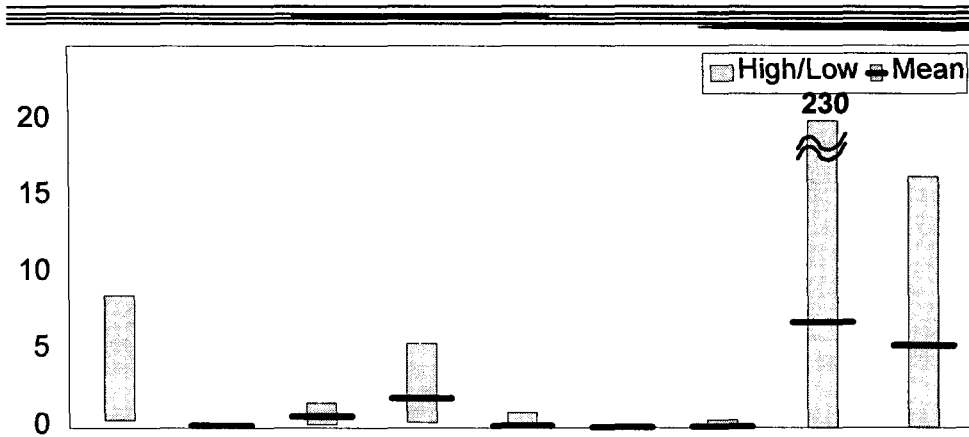


참고문헌 : 국립환경연구원(2000-2001)

그림 6. 국내 주요 특성별 토양 중 다이옥신 농도 비교

해양이나 호소에서의 저질 중 다이옥신 농도는 어패류의 생태계와 직접적인 연관이 있어 매우 중요한 자료이다. 국내 남해의 저질 중 다이옥신 오염도(0.35~8.6pg-TEQ/g)가 다른 해안의 저질(동해:0.08~0.36 pg-TEQ/g, 서해:0.21~1.65pg-TEQ/g)에 비해 높은 것으로 조사되었으나, 일본(불검출~230 pg-TEQ/g)이나 미국(0.01~16.3 pg-TEQ/g)에 비해서는 낮은 수준으로 평가되었다(그림 7).

2002년 환경 중 다이옥신 잔류 실태 조사 연구(국립환경연구원)에서 수역별로 저질 중 다이옥신 농도를 비교한 결과, 호소저질의 평균 농도(0.204 pg-TEQ/g)가 하천저질의 평균 농도(0.019 pg-TEQ/g)보다 약 10배 높은 것으로 나타났다. 이러한 요인은 호소가 정체수역으로 다이옥신이 퇴적층에 축적된 것으로 추정된다고 보고한 바 있다.



참고문헌 : 문효방 등(2000, 2001), 국립환경연구원(2000-2002)

그림 7. 국내 저질에서의 다이옥신 오염도 비교

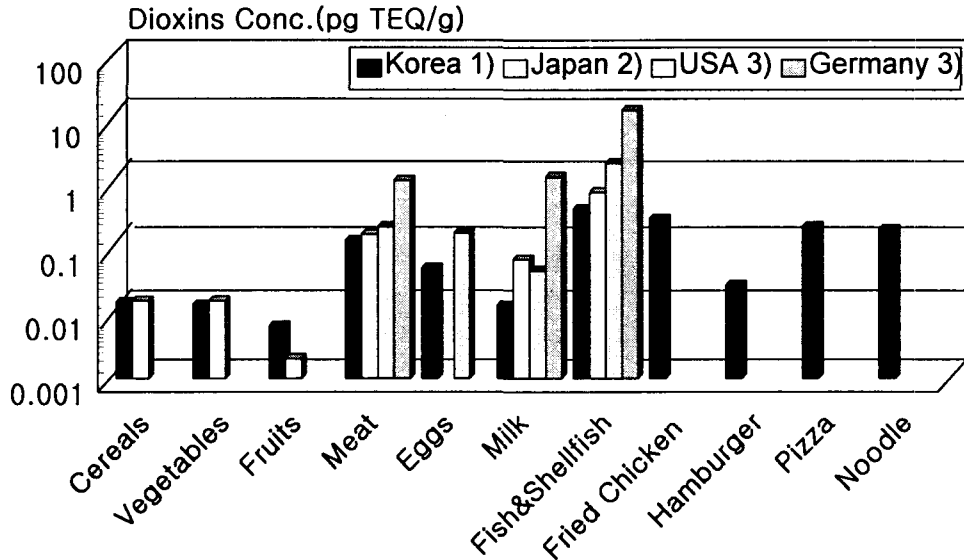
(2) 국내 식품 중 다이옥신 오염도 수준

우리 나라의 식품 중 다이옥신 오염도 평가는 1998년 Hashimoto 등이 우리 나라의 남해안에 서식하는 조개류에서의 다이옥신 오염도 결과를 발표 한 이후, 식품 의약품안전청에서 1999년에 쌀, 소고기, 우유 등의 16 가지 국내 생산 식품에 대해 PCDDs/PCDFs 및 PCBs 오염도를 측정하였다. 김연제 등(1999)은 국내에서 유통되는 패스트푸드에서의 다이옥신 오염도를 측정, 발표하기도 하였으며, 2000년 이후 많은 연구자들에 의해 국내 생산 식품의 원재료 및 가공상태에 따른 다이옥신 오염도 조사 결과를 발표하고 있다.

국내 생산 식품 중 생선(평균 0.369 pg-TEQ/g) 및 조개류(0.249 pg-TEQ/g)에서의 다이옥신이 가장 높은 것으로 조사되었으며, 육류에서의 오염도는 그리 높지 않은 것으로 나타났다. 닭튀김, 햄버거, 피자, 라면 등의 가공 식품에서의 다이옥신 오염도는 각각 평균 0.34 pg-TEQ/g, 0.028 pg-TEQ/g, 0.228 pg-TEQ/g 및 0.206 pg-TEQ/g로 조사되어 가공 식품이 가공 전 원재료에서보다 비교적 오염도를 보이는 것으로 조사되었다. 김상조 등(2002)은 조개류를 가공 전과 가공 후(끓이거나 튀김)의 다이옥신 오염도를 평가한 결과, 가공 후(끓임:0.50 pg-TEQ/g, 튀김:0.58 pg-TEQ/g)가 가공 전(평균 0.38 pg-TEQ/g)보다 높아지는 것을 관찰하였다.

그림 8에는 국내 생산 식품과 일본, 미국, 독일에서의 식품 중 다이옥신 오염도를 비교하였다. 국내 대기 및 토양에서의 다이옥신 측정 자료와 마찬가지로, 측정

식품수와 시료수가 매우 제한적이어서 많은 불확실성이 존재하지만, 먹이 사슬을 통한 다이옥신의 축적성이 우려되는 육류, 낙농품, 어패류의 경우에는 일본, 미국, 독일의 경우보다는 비교적 낮은 오염도를 보이는 반면, 환경 농도에 직접적으로 영향을 받는 곡류, 채소 및 과일류의 경우에는 일본 식품에서의 오염도와 매우 유사하거나 다소 높은 것을 관찰할 수 있었다.



참고문헌 : 식품의약품안전청(1999, 2002), 김종국(2000), 김연제 등(2001), 옥곤 등(2001), 김경심 등(2001), 최동비 등(2001), 강윤석 등(2001), 김상조 등(2002), 김기철 등(2002)

그림 8. 식품 중 다이옥신 오염도 비교

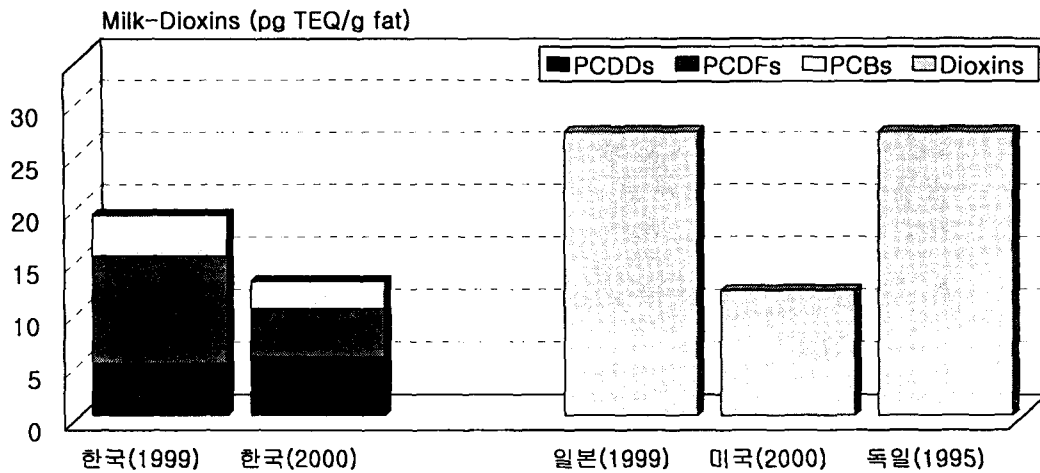
(3) 국내 성인의 인체 조직 중 다이옥신 오염도 조사

우리 나라 산모의 모유 중 다이옥신 함유량 조사 연구는 1999년 신동천 등이 서울 및 경기 지역 거주 산모(n=15)의 모유에 대한 연구 결과가 발표된 이후, 식품의약품안전청(2000)에서 대도시 및 중소도시의 산모(n=66)를 대상으로 하여 모유 중 다이옥신 함유 농도를 평가한 바 있다.

국내 모유 중 다이옥신 오염도는 1999년(평균 15.13 pg-TEQ/g fat)에 비해 2000년(평균 10.11 pg-TEQ/g fat)에는 다소 낮게 나타났으며, 이는 다이옥신류 중 PCDFs의 함유 농도가 1999년에는 평균 10 pg-TEQ/g fat로 조사된 반면 2000년에는 5 pg-TEQ/g fat 수준으로 다소 낮게 조사되었기 때문인 것으로 평가되었다.

우리 나라 산모의 모유 중 다이옥신류 함유 농도는 미국 산모의 모유 중 다이옥신류 농도와 유사한 수준이며, 폐기물 소각 처리 방식을 오랜 기간 이용해 온 일본

의 경우보다는 낮은 것으로 평가되었다(그림 9).



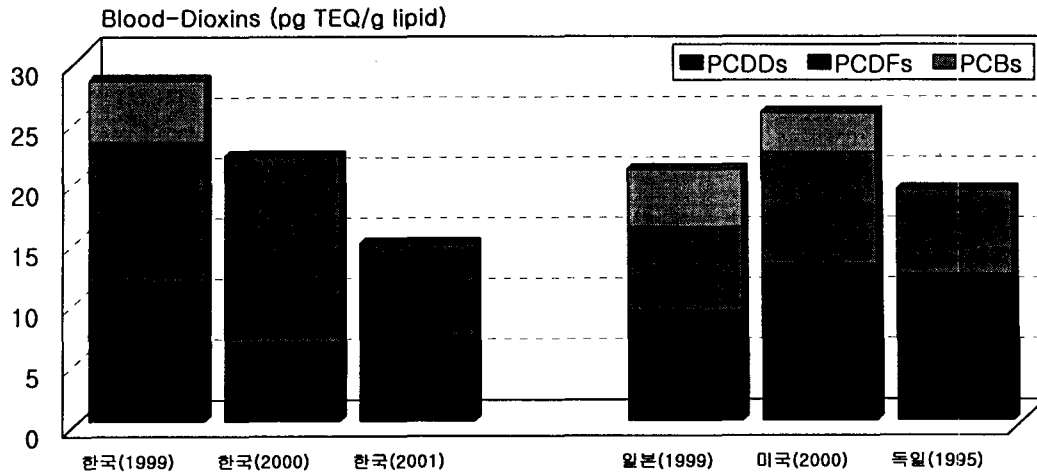
참고자료 : 1) 신동천 등(1999), 2)식품의약품안전청(2000), 3) 일본 환경부(1999), 4) US EPA(2000)

그림 9. 국가별 모유 중 다이옥신 오염도 비교

우리 나라 혈중 다이옥신 함유량 조사 연구는 1999년 환경공해연구소에서 경기 지역 거주하는 전업 주부(n=15)의 혈액에 대한 연구 결과가 발표된 이후, 식품의약품안전청(2000)에서 중소도시의 성인 남자(n=15)를 대상으로 하여 혈중 다이옥신 함유 농도를 평가한 바 있다. 또한 환경공해연구소(2001)는 서울 지역에 거주하는 성인 남녀(n=26)를 대상으로 혈중 다이옥신 농도를 평가하였다.

한국 성인 중 비흡연자의 혈중 PCDDs/PCDFs 오염도는 평균 23 pg-TEQ/g lipid (1999년), 22 pg-TEQ/g lipid (2000년) 및 15 pg-TEQ/g lipid (2001년)인 것으로 조사되었으며, 대상 집단은 다르지만, 해마다 감소하고 있는 것으로 나타났다.

그림 10에서는 국내 혈중 다이옥신 오염도 자료와 국가별 혈중 다이옥신 오염도를 비교하였다. PCDDs/PCDFs의 농도만을 비교해보면, 국내 비흡연 성인의 혈중 다이옥신 오염도가 일본(평균 15.9 pg-TEQ/g lipid, 1999), 미국(평균 22.1 pg-TEQ/g lipid, 2000), 독일(평균 19.0 pg-TEQ/g lipid, 1995)과 유사하거나 다소 높은 것을 알 수 있다. 혈중 PCBs 농도는 국내에서는 1999년에서만 측정되었으며, 약 5 pg-TEQ/g lipid 수준이었다. 국외 자료는 일본과 미국의 경우에만 조사되었으며, 혈중 PCBs 오염 수준은 일본이 약 5 pg-TEQ/g lipid 수준으로 국내 자료와 거의 근접하였으며, 미국은 약 3 pg-TEQ/g lipid으로 국내 농도보다는 다소 낮은 것으로 평가되었다.



자료출처 : 1) 연세대 환경공해연구소(1999), 2)식품의약품안전청(2000),
3) 연세대 환경공해연구소(2001), 4) 일본 환경부(1999), 5) US EPA(2000)

그림 10. 국가별 혈중 다이옥신 오염도 비교

(4) 다이옥신 오염사고나 작업장에서의 고농도 노출평가

다이옥신에 의한 고농도 노출은 세베소 사건과 같은 오염 사고로 인한 일반인들의 고농도 노출의 경우와 제초제 생산공장, 폐기물 소각장 등의 다이옥신 노출이 우려되는 작업장에서 근무하는 근로자들의 고농도 노출이 있다.

국내에서는 일반인들에 대한 다이옥신의 고농도 노출 사건은 발생된 바 없으며, 고농도 노출 근로자들에 대한 다이옥신 노출 평가 자료가 거의 없기 때문에 본 연구에서는 현재까지 전 세계적으로 알려진 다이옥신 오염사고와 외국에서 연구 발표된 다이옥신 고농도 노출 근로자에 대한 평가들을 요약하였다.

미국에서의 타임비치(Times Beach)와 이탈리아의 세베소(Seveso)에서의 화학공장 폭발로 인한 다이옥신 오염 사고는 지역 주민의 고농도 다이옥신 노출을 유발시킨 사건으로 잘 알려져 있다. 세베소(Seveso)에서 다이옥신의 폭발 사고시 노출된 주민의 혈액 중 2,3,7,8-TCDD 오염 수준은 56,000 pg-TEQ/g lipid였으며, 고노출지역과 일반적인 오염지역에서의 혈중 다이옥신 농도 중앙값은 각각 450 pg -I-TEQ/g lipid, 126 pg-TEQ/g lipid로 조사되었다.

일본(1968)과 타이완(1978)에서 발생한 식품오염은 PCBs의 오염으로 인한 것으로 알려져 있다. 두 지역 모두 소량의 다이옥신이 식용기름에 포함되어 발생한 것이다. PCBs와 PCDFs, PCQs로 오염된 가네미(Kanemi) 쌀겨 식용류를 섭취한 일본 유소(Yushio) 사건에서는 노출 그룹에 대한 다이옥신 일일 섭취량이 154,000 pg-TEQ/kg

-day나 된다고 평가되었으며, 이것은 일반인의 평균 섭취량보다 십만배 정도 높은 것이다.

대표적인 작업장에서의 노출은 2,4,5-trichlorophenoxy acetic acid(2,4,5-T)와 같은 제초제 생산시 불순물로 포함된 2,3,7,8-TCDD에 의한 것을 들 수 있다. 고농도로 노출된 근로자들의 역학 자료에서는 혈중 2,3,7,8-TCDD 농도가 140~2000 pg-TEQ/g lipid 수준으로 평가되며, 이것은 일반인구집단에 비해 10배에서 100배 정도 높은 수준인 것이다.

(5) 국내 성인의 다이옥신 인체 일일 노출량 평가

환경 및 식품 중 다이옥신 오염에 의한 성인의 다이옥신 일일 노출량은 각 매체에서의 평균 오염도와 각 매체별 성인의 일일 접촉율(일일호흡율, 일일 섭취량 등)을 이용하여 산출하였다. 앞에서 조사된 대기, 수질, 토양 및 식품에서의 다이옥신의 평균 농도에 노출됨으로 인한 인체 일일 노출량 평가하기 위해, 대기와 토양의 경우에는 주거지역의 측정치만을 고려하였으며, 아직까지는 국내 먹는 물에서의 다이옥신 오염도 측정 자료가 발표된 바 없고, 미국, 일본 등의 기존 연구에서 음용수 중 다이옥신에 의한 일일 노출량은 매우 미미하게 평가되고 있어, 본 원고에서도 먹는 물에 의한 다이옥신의 일일 노출량 예측은 제외하였다.

국내 대기, 토양 및 식품 중 다이옥신 오염에 의한 성인의 일일 노출량은 약 0.50 pg-TEQ/kg-day로 산출되었으며, 식품 오염에 의한 섭취 노출 기여율은 약 90%, 대기 오염에 의한 호흡 노출 기여율은 약 10% 정도, 그리고 토양에 의한 노출량은 0.1%로 매우 미미한 수준임을 알 수 있었다(그림 11). 식품 중에서는 어패류가 약 40%로 가장 큰 기여율을 보이고 있었으며, 육류, 낙농품 및 난류에 의한 기여율은 약 10% 수준으로 평가되었다. 이에 비해, 우리 나라의 경우에는 곡류의 섭취량이 매우 크기 때문에, 이에 의한 섭취 노출 기여율은 약 18%를 차지하고 있었다.

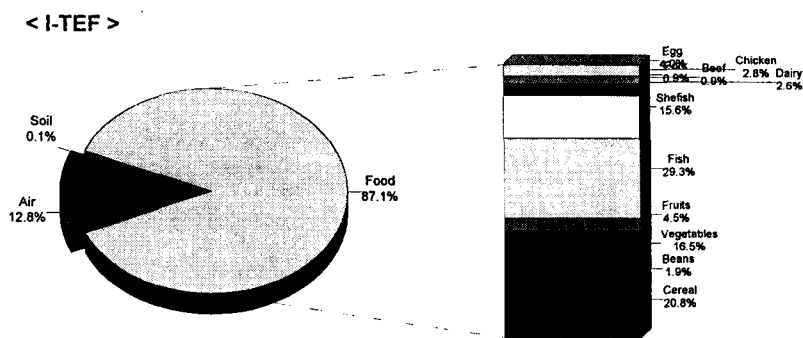


그림 11. 국내 성인의 노출 경로별 다이옥신 일일 노출량 기여율 비교

일본, 미국, 및 독일에서의 인체 일일 평균 노출량은 각각 평균 2.62 pg-TEQ/kg-day(일본 환경부, 1999), 0.93 pg-TEQ/kg-day(US EPA, 2000) 및 2.00 pg-TEQ/kg-day(US EPA, 2000)수준으로 평가되고 있어 국내 성인의 다이옥신 일일 노출량은 이들에 비해 매우 낮은 수준인 것으로 나타났다.

일본의 경우, 환경 및 식품 중 co-planar PCBs까지 모두 고려한 성인의 일일 노출량은 2.62 pg-TEQ/kg-day로서 식품 섭취에 의한 노출량이 전체의 92%를 차지하고 있으며, 공기 흡입에 의한 노출량은 6.5%로 조사되었다. 미국은 식품에서만 co-planar PCBs를 고려하고, 대기와 토양에서는 PCDDs/PCDFs만을 대상으로 한 성인의 일일 노출량은 0.93 pg-TEQ/kg-day으로서 역시 음식 섭취에 의한 노출량이 전체의 96%를 차지하고 있으며, 호흡 노출이 흡입에 의한 노출량이 2.2%이었다. 독일의 환경 및 식품 중 PCDDs/PCDFs만을 대상으로 한 성인의 일일 노출량은 2.00 pg-TEQ/kg-day이고, 총 노출량의 98%가 식품 오염에서 기인되었으며, 호흡 노출로 인해서는 약 1% 정도의 기여율을 나타내는 것으로 평가되었다. 국내의 대기, 토양 및 식품 중 다이옥신 오염에 의한 성인 일일 노출량은 일본, 미국 및 독일에 비해 그 수준은 낮으나, 이들에 비해 식품에 의한 기여율은 다소 낮고, 대기 중 호흡 노출에 의한 기여율(약 10%)은 높은 것으로 평가되었다(그림 12).

세계보건기구에서는 선진국의 다양한 연구 자료를 수집하여 성인 60kg을 기준으로 PCDDs/PCDFs 일일 섭취량은 50~200 pg-I-TEQ이고, 단위 체중당으로는 1~3 pg-TEQ/kg-day로 평가하고 있다. 만약 다이옥신과 유사한 PCBs(non-ortho 와 mono-ortho PCBs)를 고려한다면, 다이옥신류의 일일 노출량은 2~3배 정도 더 높아질 것이라고 평가하고 있다. 여러 국가별로 PCDDs/PCDFs 및 co-planar PCBs의 절대적 수준에는 차이가 있음에도 불구하고, 미국, 네덜란드, 영국, 독일과 같이 1980년대 후반에 다이옥신 배출 감소 정책을 시작한 나라들에서는 확실히 식품에서의 PCDDs/PCDFs 및 co-planar PCBs의 수준이 감소되었으며, 결과적으로 7년 동안 식품을 통한 섭취량이 약 1/2배 정도로 낮아진 것을 관찰할 수 있었다고 한다.

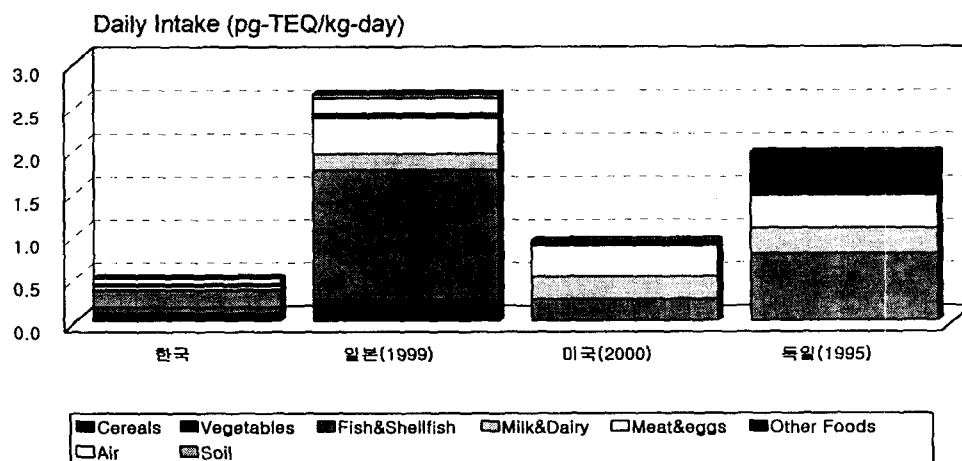


그림 12. 국가별 다이옥신 오염에 의한 성인의 일일 노출량 비교

국내 대기, 토양 및 식품 중 다이옥신 오염에 의한 성인의 인체 일일 노출량은 0.49 ~ 0.50 pg-TEQ/kg-day 수준으로 평가된 반면, 모유 중 농도를 바탕으로 역추산한 평생일일평균노출량, LADD는 1.28 ~ 1.51 pg-TEQ/kg-day이었다. 또한 혈중 농도를 바탕으로 추정된 평생일일평균노출량, LADD는 1.80 pg-TEQ/kg-day으로서 모유에서의 다이옥신 농도를 바탕으로 산출한 LADD와 유사한 수준으로 평가되었다(그림 13).

국내 환경 매체, 식품 또는 인체 시료에서의 다이옥신 오염도 평가 자료가 매우 제한적이기 때문에 많은 불확실성이 존재할 것이다. 특히, 국내 환경 매체 및 식품 중 오염도 측정 자료에 의한 일일 노출량의 경우에는 현대인들이 많이 섭취하고 있는 가공식품, 수입 육류 등이 포함되지 않았고, 대기 및 토양 오염도 자료도 매우 한정적이었기 때문에 참값보다는 과소평가될 우려가 큰 것으로 평가된다. 이에 비해 인체 조직 중 다이옥신 오염도를 바탕으로 역산출한 평생일일평균노출량의 경우에는 대상자들의 연령이 장년층 이상이 많고, 다이옥신의 체내 반감기나 체내 흡수율 등의 변수의 불확실성이 존재하며, 초기 연구자료들은 다이옥신에 노출될 가능성이 많은 지역에 거주하고 있는 주민들에 대해 우선적으로 평가한 결과들이 대부분이어서 참값보다는 다소 과대평가될 우려가 있을 것으로 평가된다.

따라서, 제한적인 국내 다이옥신류의 측정 자료, 평가 방법상의 불확실성을 고려할 때, 국내 성인의 다이옥신류의 일일 노출 수준은 0.5 ~ 2 pg-TEQ/kg-day의 범위 내에 존재할 것으로 판단된다.

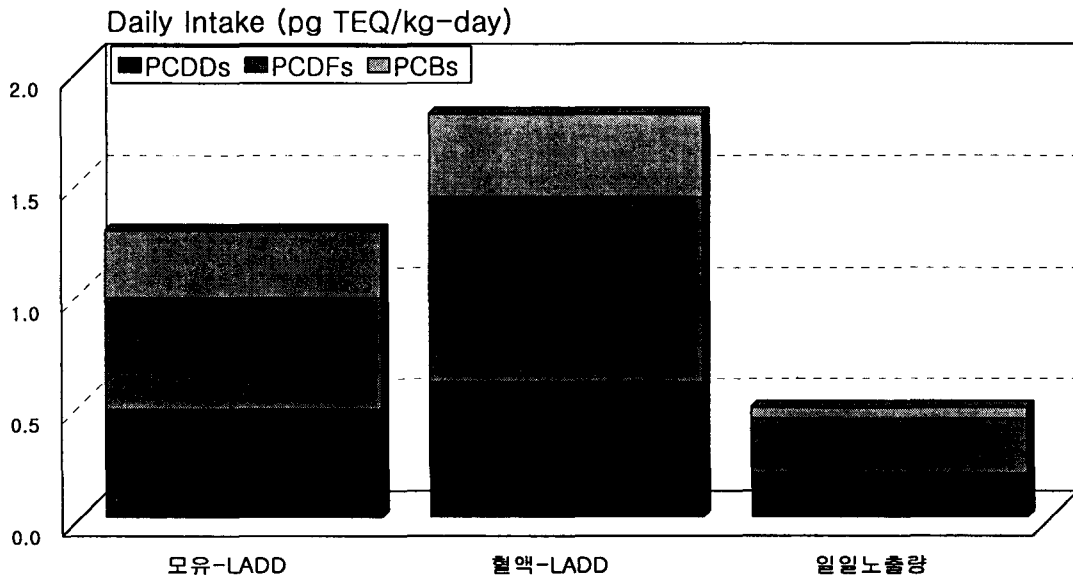


그림 13. 산출 방법에 따른 국내 다이옥신 농도의 인체 일일 노출량 비교

(6) 국내 다이옥신 노출에 따른 인체 위해성 평가

다이옥신의 인체 유해 영향 평가는 1985년 미국 환경보호청에 의해 동물실험 결과를 위주로 인체발암가능성이 처음으로 제시된 이후, 1991년 인체 위해성의 재평가가 시행되어, 1994년 동물실험자료 및 역학자료를 포함한 다이옥신의 인체 위해성 평가서 초안을 발표하였다. 재평가 초안에서는 다이옥신이 인체 독성 및 발암가능성 대한 증거를 제시하고 있으며, 일생 동안의 다이옥신 폭로로 인해 백만명당 1명(1×10^{-6})의 초과발암위해도를 일으킬 수 있는 농도를 0.0001 pg-TEQ/kg 체중/day로 제안하고 있다.

미국 환경보호청에서 제안하고 있는 다이옥신의 발암 위해도, 0.0001 pg-TEQ/kg 체중/day를 이용하여 산출된 연간 초과 발암 위해도가 사망 위해도와 동일하다고 가정하여 국내에서의 다이옥신 노출로 인한 연간 사망 위해도를 추계하였다. 우리나라의 총 국민, 45,985,289명(통계연보, 2000)이 국내 환경 및 식품 중 다이옥신 오염도를 바탕으로 산출된 다이옥신의 일일인체노출량, 0.5 pg-TEQ/kg-day으로 평생(60년) 노출될 경우, 이로 인한 연간 초과 발암 위해도는 7.1×10^{-6} (백만명당 7.1명)으로 추계되었다. 이에 비해, 국내 모유 또는 혈액 중 다이옥신 오염도를 바탕으로 산출된 인체 부하량에 의한 연간 초과 발암 위해도는 1.4×10^{-5} (십만명당 1.4명)으로 추계되었다. 이러한 국내 다이옥신 오염으로 인한 인체 위해도는 흡연, 대기오염, 교통사고 등에 의한 위해도보다는 낮은 수준으로 나타났지만, 환경 중 화학물질에 의한 허용 위해도 수준에 근접하거나 초과하는 범위로 예측되었다.

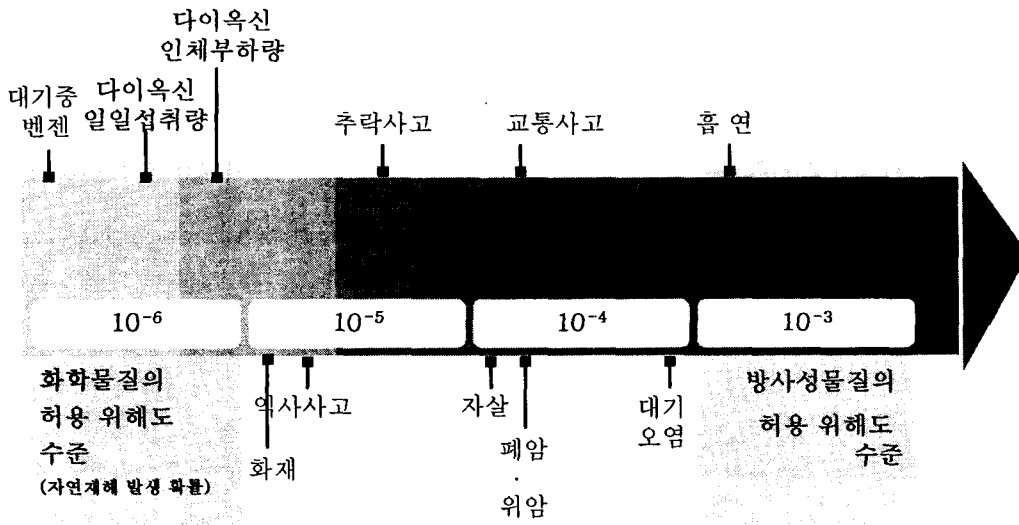


그림 14. 다이옥신의 인체 발암 위해도 수준 비교

다이옥신의 독성 영향에 대한 MOE 값을 그림 15에 비교하였다. 다이옥신으로 인한 생식기 이상에 대한 NOAEL(no-observed adverse effect level)은 Murry 등 (1979)의 연구 결과인 1000 pg/kg-day를 이용하였으며, 이를 인체 용량을 전환(285 pg/kg-day)을 low effect level로 적용하였다. 자궁내막증은 원숭이의 NOAEL, 126 pg/kg-day(Rier et al., 1993)을 인체 용량을 전환한 후, 불확실성 계수 2를 적용하여 사용하였다. 어머니의 모유나 혈액을 통해 태아 및 신생아의 신경행동학적 영향을 평가하기 위해 Schantz와 Bowman(1989)의 연구 결과인 모체 부하량, 19 ng/kg을 인체 부하량을 전환 후, 불확실성 계수, 2를 적용한 값인 8 ng/kg을 이용하여 MOE를 산출하였다. 국내 다이옥신 노출로 인한 생식독성 및 자궁내막증에 대한 MOE는 매우 큰 값으로 예측되었으나, 태아 및 신생아에 대한 신경행동학적 영향의 MOE는 매우 안전한 수준은 아닐 수 있는 것으로 예측되었다.

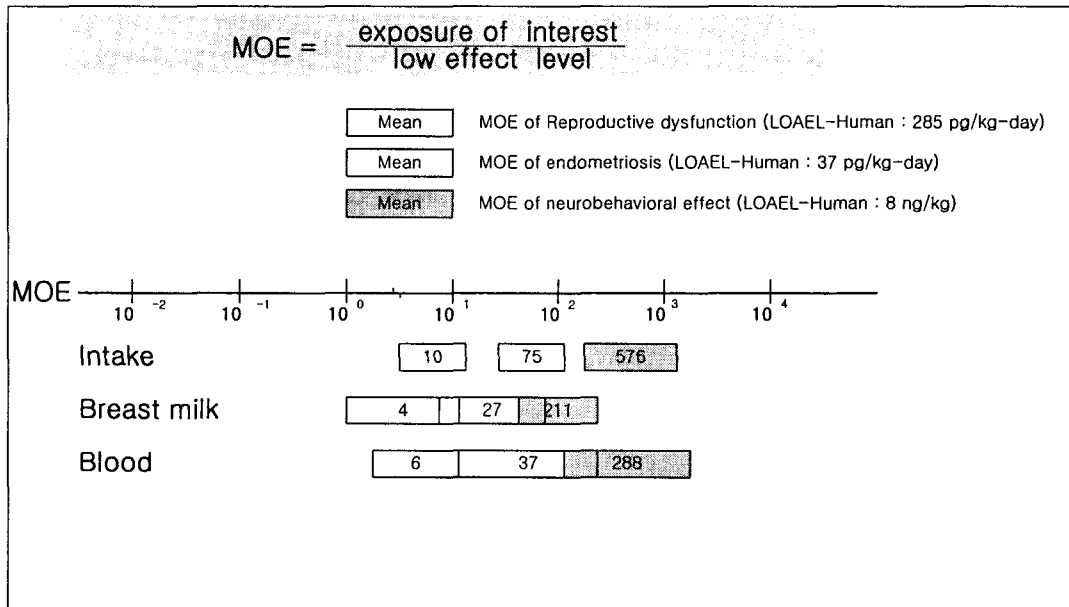


그림 15. 다이옥신의 인체 독성 영향에 대한 MOE 비교

인체 발암물질로 분류하고 있는 다이옥신의 경우, 미국에서도 발암성에 대한 위해성 평가 결과를 기준으로 한 관리를 하고 있지는 못한 실정이다. 미국에서는 과거 환경중에 노출된 다이옥신으로 인해 이미 우리 생활과 관련된 모든 곳에서 발생하여 분포하고 있고, 우리가 원하든 원하지 않든 간에 노출될 수밖에 없는 상황에 있는 것임을 고려하여 인체 허용 기준을 1 pgTEQ/kg-day로 제안하고 있다. 세계보건기구에서도 실험동물자료를 바탕으로 인체 허용 기준을 1~4 pgTEQ/kg-day로 제안하고 있으며, 일본은 4 pgTEQ/kg-day을 일일허용기준으로 적용하고 있다. 본 원고에서는 국내 성인의 노출 수준도 이를 초과하지는 않는 것으로 평가되었다.

이상과 같이 국내 환경 매체 및 인체 조직에서의 다이옥신 오염도를 살펴보고, 이로 인한 인체 일일 노출량을 예측하였으며, 이로 인한 인체 위해성을 평가하였다. 그러나, 이와 같은 평가는 아직까지 국내 환경 및 인체에 대한 다이옥신 노출 평가 자료가 매우 제한적이기 때문에 본 원고에서 평가된 국내 성인의 일일 노출 수준 및 이로 인한 인체 위해성은 많은 불확실성을 내포하고 있다.

다이옥신은 현대 사회에서 가장 큰 비중을 두고 해결해 나아가야 할 문제이다. 그 이유는 첫째, 이미 우리 생활과 관련된 모든 곳에서 발생하여 분포하고 있어 우리가 원하던 원치 않든 간에 노출될 수밖에 없는 다이옥신은 현재까지 논의 되어온 발암성 이외에 여러 심각할 수 있는 유해 가능성들이 최근에 제시되고 있기 때문이다. 둘째, 다이옥신은 산업화 과정의 부산물로 알려져 있기 때문에 오랜 기간동안 산업화·도시화를 이루어왔던 선진국일수록 더 많이 노출되고 있다. 그러나, 다이옥신 대책을 소홀히 한다면 어느 시점에서는 우리 나라가 선진국보다 더 오염되고 오히려 선진국에서 우리 나라의 식품을 금지하게 될 지도 모른다. 물론 이것은 다이옥신을 계속해서 줄여 나가자는 바램을 강조하기 위한 가상적인 사례에 불과하다. 그러나, 미국이 80년대 중반부터 꾸준히 노력하여 미국인의 혈중 다이옥신 농도가 90년대로 접어들면서 다소 감소하고 있으며, 현재 환경 중 농도는 1987년의 오염도보다 80%가 감소된 수준으로 평가되고 있다고 발표한 바 있다(US EPA, 2000). 이러한 사실을 생각한다면 불가능한 일만은 아니다. 이제 환경문제는 개방된 세계사회에서 인식의 문제로부터 출발하여 통상교역의 문제로까지 발전할 수 있음은 비단 다이옥신의 예가 아니더라도 알 수 있다. 선진국 수준의 인식과 과학이 수반되지 않으면 결국 영원히 후진국 대접을 면치 못하게 될 것이다. 마지막으로, 앞으로 먼 미래 후손에게 물려줄 환경을 생각한다면 더 이상 수수 방관할 문제가 아닌 것이다.

이제부터 우리가 해야 할 일은 지속적이고, 꾸준한 노력을 통해 다이옥신의 노출을 최소화하는 것이다. 우선, 다이옥신에 특별히 고농도로 오염된 식품을 가려내어 불필요한 인체 노출을 사전에 막을 수 있는 준비를 철저히 하는 것이다. 우리 나라의 경우 식품의 60% 이상이 수입되는 현실에서 하루속히 다이옥신의 인체 허용 기준치를 정하여 적극적인 관리방안을 마련하여야 한다. 또한 다이옥신은 산업화가 진전될수록 증가해왔기 때문에, 이제부터라도 연소과정과 화학공정 등의 주요 다이옥신 배출원을 원천적으로 잘 관리함으로써, 총량적으로 다이옥신의 배출이 계속 줄어들 수 있도록 노력하여야 한다. 아울러 국민들의 지나친 우려는 문제해결에 도움이 되지 않으므로 정부나 관련 전문가들은 일반인에 대한 홍보와 이해증진을 위해 부단히 힘써야 할 것이다. 이상과 같이 우리 나라에서의 다이옥신 문제를 적극적으로 해결하기 위해 정부, 시민단체, 전문가 등이 함께 이해하고 지속적으로 노력할 수 있는 터전을 반드시 만들어야 한다.

참고문헌

- 국립환경연구원. 내분비계 장애물질 환경잔류실태 조사 보고서, 2000년 3월
- 국립환경연구원. 내분비계 장애물질 환경잔류실태 조사 보고서, 2001년 5월
- 국립환경연구원. 내분비계 장애물질 환경잔류실태 조사(결과발표자료), 2002년 8월
- 보건복지부. 1998년도 국민건강·영양조사 심층·연계분석, 2000년 12월
- 식품의약품안전청. 식품중 다이옥신 모니터링(I), 1999년
- 식품의약품안전청. 한국인 인체시료에서의 다이옥신등에 대한 모니터링, 2000년
- 연세대 환경공해연구소. 다이옥신의 일일인체허용노출량 및 환경매체별 기준치 제안 연구. 국립환경연구원, 2002
- 연세대 환경공해연구소. 환경오염물질의 위해성 평가 및 관리 기술 : 대기오염물질의 위해성 평가 및 관리 기술. 환경부, 1999년
- 일본 환경청. 환경청고시 제 6호
- Choi D, et al., Determining dioxins-like compounds in selected Korean foods. *Chemosphere* 2002;46:1423-1472
- Choi D, et al., PCDD, PCDF, PCB concentrations of meat in Korea. *Organohalogen Compounds* 2001;51:384-387
- Hashimoto S, Cho HS, Morita M. Polychlorinated dibenzo-p-dioxins and polychlorinated dibenzofurans in shellfishes from south coast of Korea, *Chemosphere* 1998;37(5):951-959
- Im S, et al., Concentrations and profiles of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans in soils from Korea. *Environ. Sci. Tech.* 2002;36(17):3700-3705
- Japan Environment Agency of Environmental Health Committee Central Environment Council. Memorandum of Tolerable Daily Intake (TDI) of Dioxin and related compounds, 1999a
- Japan Environment Agency of Environmental Risk Assessment. Law Concerning Special Measures against Dioxins, 1999b
- Japan Environment Agency of Environmental Risk Assessment. Report on Tolerable Daily Intake (TDI) of Dioxins and Related Compounds, 1999c
- Japan Ministry of the Environment Office of Dioxins Control, Dioxin, 1999d
- Japan Ministry of the Environment Office of Dioxins Control, Dioxin, 2001
- Jeong G, et al., Distribution characteristics of 2,3,7,8-substituted dioxins in the fresh water fishes from the major rivers in S. Korea. *Organohalogen Compounds* 2001;51:247-250
- Kang Y, et al., Polychlorinated dibenzo-p-dioxins/furans and dioxin-like polychlorinated biphenyls in foodstuffs from Korea. *Organohalogen Compounds* 2001;51:392-395
- Kim D, et al., Distribution characteristics of PCDD/DFs in soil around the MSWIs from Korea. *Organohalogen Compounds* 2002;57:325-328
- Kim K, et al., Analysis of polychlorodibenzo-p-dioxins and dibenzofurans(PCDD/PCDFs) in baked salts and bamboo salts. *Organohalogen Compounds* 2002;57:129-132
- Kim K, et al., Polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzo-furans in fast food of

- Korea. Organohalogen Compounds 2001;51;372-375
- Kim M, et al., The concentrations of PCDDs & PCDFs in the powdered milk marketed in Korea. Organohalogen Compounds 2001;51;319-320
- Kim S, et al., Polychlorinated dibenzo-p-dioxins and polychlorinated dibenzofurans in raw and cooked fisheries products. Organohalogen Compounds 2002;57;169-172
- Kim S, et al., Polychlorinated dibenzo-p-dioxins and polychlorinated dibenzofurans in soil samples from urban and industrial areas of Korea. Organohalogen Compounds 2001;51;146-149
- Kim Y, et al., Levels of PCDDs and PCDFs in two kinds of fast foods in Korea. Chemosphere 2001;43;851-855
- Kim Y, Yu JH, Kim MS. The study on the contents of PCDDs/PCDFs in ambient air, edible goods and human serum in Korea, Organohalogen Compounds 1999;43;167-171
- Lee H, et al, Risk assessment of the PCDDs/Fs derived from the ambient air city in Korea. Organohalogen Compounds 1999;44;467-470
- Moon H, et al., Distribution characteristics of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and polychlorinated dibenzofurans in sediments from the southeastern coastal areas of Korea. Organohalogen Compounds 2000;46;427-430
- Moon H, et al., Levels and patterns of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and polychlorinated dibenzofurans in sediments from Korean coast. Organohalogen Compounds 2001;51;35-38
- Ok G, et al., Annual variation and behavior of PCDDs/DFs in ambient air, Korea. Organohalogen Compounds 2001;51;100-103
- Ok G, et al., Polychlorinated dibenzo-p-dioxins and polychlorinated dibenzofurans in marked fish and meat samples in the market of Pusan city, Korea. Organohalogen Compounds 2001;51;328-338
- US EPA. Exposure and human health reassessment of 2,3,7,8- tetrachlorodibenzo-p-dioxin (TCDD) and related compounds : Part I. Estimating exposure to dioxin-like compounds, 2000
- US EPA. Exposure and human health reassessment of 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin(TCDD) and related compounds : Part III. Integrated summary and risk characterization for 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo -p-dioxin(TCDD) and related compounds, 2000d
- US EPA. PCDD(Dioxins) and PCDF(Furans) : Sources and Regulations addendum, 2000
- US EPA. Toxicology and risk assessment approaches for the 21st century. EPA-NCEA, 2000
- WHO. Assessment of the health risk of dioxins : Re-evaluation of the Tolerable Daily Intake (TDI). WHO-ECEH-IPCS(WHO European Centre for Environment and Health International Programme on Chemical Safety), 1998
- Yang JY, Shin DC, Park SG, et al.. PCDDs, PCDFs, and PCBs concentration in breast milk from two areas in Korea: body burden of mothers and implications for feeding infants, chemosphere 2002;46;419-428