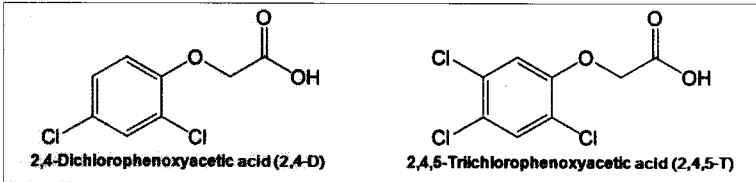


나노 바이오공법으로 고엽제 오염 토양 복원



▶ 에이전트 오렌지 구성성분 구조식

고엽제명	주성분	살포량(L)	살포기간
Orange	2,4-D; 2,4,5-T	40,299,005	1965 ~ 1970
White	2,4-D; 피크로람	21,322,790	1965 ~ 1971
Blue	카고딜산	4,353,005	1965 ~ 1971
Purple	2,4-D; 2,4,5-T	548,833	1962 ~ 1965
Pink	2,4,5-T	468,820	1962 ~ 1965
Green	2,4,5-T	31,070	1962 ~ 1965

▶ 월남전 때 살포된 고엽제의 종류와 살포량

란 사염화 다이옥신이다. 우리가 통상 알고 있는 다이옥신이란 다염화 다이옥신류와 다염화 퓨란류를 모두 합하여 지칭하는데 이들 화합물은 치환된 염소의 개수와 위치에 따라 각각 75종과 135종이나 되어 총 210개의 혼합물이다. 하지만 이들 중에서 치명적인 독성을 나타내는 것은 17종이고, 그 중에 2,3,7,8-TCDD가 가장 독성이 강한 것으로 알려져 있다. 따라서 우리가 알고 있는 고엽제의 독성은 주로 2ppm 정도 미량의 불순물로 들어있는 2,3,7,8-TCDD의 독성에 기인한다고 볼 수 있다.

여러 가지 TCDD의 독성 중에서 제일 흔하게 나타나는 것이 피부병의 일종인 염소좌창인데 지난 우크라이나 대선 때 대선후보였던 유셴코 대통령이 선거유세 도중에 다이옥신에 테러를 당해서 얼굴 등의 피부가 심각하게 손상이 된 사례가 있었다. 우리나라에도 주로 월남전 참전 용사들 사이에 이러한 염소좌창 증세를 많이 보이고 있다. 우리나라 DMZ 지역에서도 군사적인 목적으로 시야를 확보하기 위해 오래전 고엽제를 대량 살포했다는 언론 보도가 있었다. 이런 경우에 고엽제를 대량 사용했다 하더라도 상대적으로 짧은 고엽제의 반감기와 긴 다이옥신의 반감기를 감안할 때 지금은 주로 다이옥신에 의해 토양이 오염되어 있을 확률이 높다.

분 법매립 의혹을 불러일으키고 있는 고엽제는 2,4-디클로로페녹시아세트산(2,4-D)과 2,4,5-트리클로로페녹시아세트산(2,4,5-T)의 두 가지 화합물을 1:1로 물에 섞어서 만든 '에이전트 오렌지'란 상품명 of 제조제이다. 따라서 고체인 두 화합물을 살포하기에 좋도록 물에 섞어서 통상 드럼통에 보관하여 사용한다. 이들 고엽제는 미국의 다우케미칼사에서 제조하여 1965년부터 1970년까지 주로 월남전에서 비행기를 이용하여 정글에 살포하여 모든 초목들을 제거하고 시야를 확보하는데 사용하였다.

독성 제일 강한 2,3,7,8-TCDD

이들 2,4-D와 2,4,5-T 자체도 내분비장애와 발암 등의 여러 독성이 나중에 알려졌지만 실제로 문제가 되는 것은 제조과정에서 부산물로 합성되어 미량으로 포함되어 있는 2,3,7,8-테트라클로로다이벤조 파라 다이옥신(2,3,7,8-TCDD)이

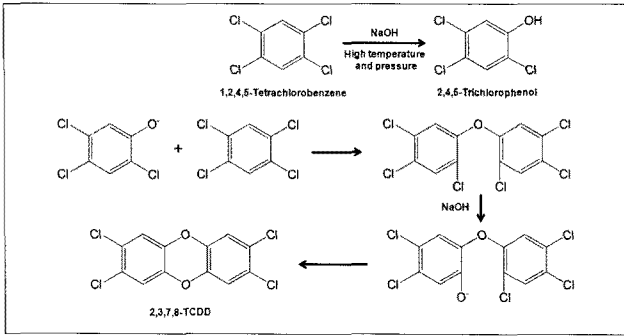
혈액 속에 미량의 다이옥신 항상 존재

월남전에서 고엽제 사용이 금지된 이후에 다이옥신은 주로 폐기물 소각과정에서 발생하고 있다. 다양한 쓰레기 성분 중에 소금에 함유된

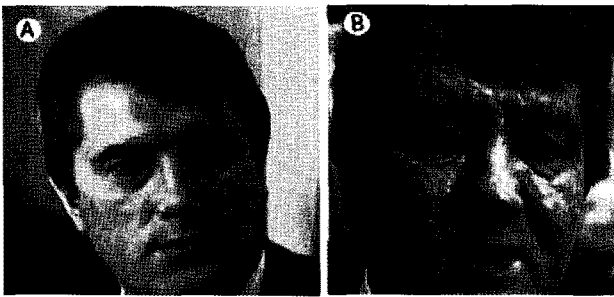


글 **장윤석** 포항공대
환경공학부 교수
yschang@postech.ac.kr

글쓴이는 연세대학교 화학과 졸업 후 동대학원에서 석사학위를, 오리곤주립대학교에서 박사학위를 받았다. MIT 연구 교수, 기초과학지원연구원 질량분석그룹장, 한양대학교 화학과 교수 등을 지냈다.



▶▶ 치명적인 독성을 가진 사염화 다이옥신의 구조식



▶▶ 우크라이나 전대통령 유셴코의 다이옥신 중독

염소성분이 탄화수소와 결합하여 300~400℃ 정도의 온도에서 미량의 다이옥신을 합성하고 이들 다이옥신은 주로 소각시 발생하는 분진 등에 묻어 굴뚝을 통해 대기로 방출된다. 따라서 정부는 모든 소각시설의 굴뚝에서 다이옥신의 배출 농도를 법으로 규제하고 있다. 이렇게 굴뚝으로 방출된 다이옥신은 바람 등을 통해 주변으로 확산되며, 최종적으로는 건식침착이나 비, 눈에 의한 습식침착으로 토양이나 수계를 오염시키게 된다.

토양에 흡착된 다이옥신은 대부분 토양 표면에 흡착이 되어 땅 속 깊이 스며들지는 않으나 수계로 유입된 다이옥신은 플랑크톤으로부터 시작해서 먹이사슬을 통해 어류의 몸 속에 축적이 되고 최종적으로 이를 섭취한 사람의 몸 속으로 들어오게 된다. 다이옥신은 화학구조상 친지질성이 강해서 주로 지방조직에 잘 달라붙는다. 통상 우리나라 성인의 경우 혈액 속에 8~10pgTEQ/lipid의 농도로 존재하고 있다.

물에 잘 녹지 않고 토양흡착력 강해

위에서 언급했다시피 보통 우리나라 기준으로 토양에는 수나노그램 정도의 다이옥신이 일반적으로 존재하고 있어 이들을 시급히 정화할 필요는 없으나 칠곡의 경우처럼 어떤

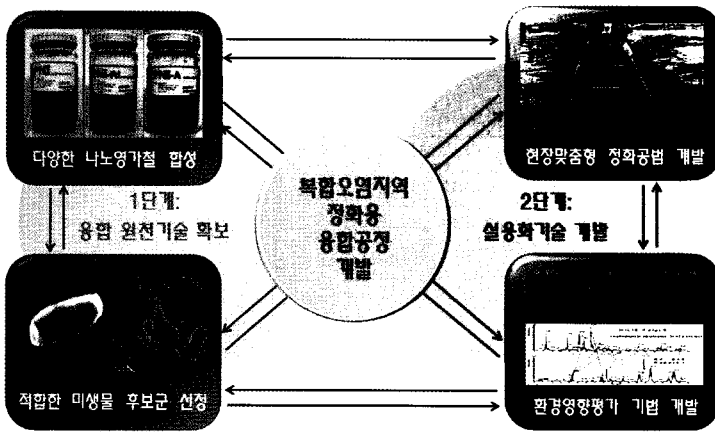
구분	미국		일본	
	기준 값	참고사항	기준 값	참고사항
대기	-	-	0.8 pg-TEQ/Nm ³	-
수질	0.005 pg/L	권고치 (Human health for consumption of water + organism)	1 pg-TEQ/L	공공용수 (네덜란드 지하수 기준 값과 동일)
먹는물	30 (최대값) 0 (목표값)	2,3,7,8-TCDD기준, MDL 5 pg/L 제시	1 pg-TEQ/L	검토 중임
토양 (pg TEQ/g)	1,000 (거주지) 5,000 ~ 20,000 (상업,공업지)	조사대상선정 오염도양 판단 값	1,000	250 이상인 경우 주기적 모니터링
1일 섭취 허용량(TDD)	-	1 pg TEQ/kg-day	-	4 pg TEQ/kg-day

▶▶ 미국과 일본의 다이옥신 기준

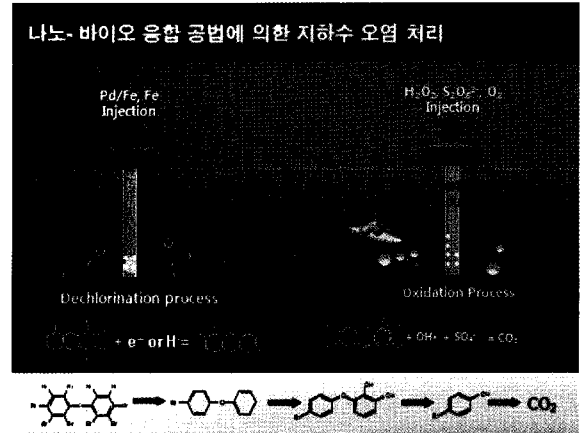
사건에 의해 토양이나 지하수가 오염되었다고 한다면 이를 정화하기 위한 다각도의 노력이 필요할 것이다. 우선 복원 전에 토양과 지하수의 다이옥신 농도와 분포현황을 정확히 파악하는 것이 중요한데 고염제 누출에 의한 토양이나 지하수 오염은 균일하게 오염되지 않고 어떤 특정부분이 다른 지역보다 심하게 오염될 확률이 높기 때문에 넓은 지역에서 이러한 오염지역을 찾아내는 것이 매우 어렵다.

다이옥신의 특성상 토양 내에서의 이동은 물에 잘 녹지 않고 토양흡착력이 강한 성질 때문에 잘 이루어지지 않아서 토양오염에 의한 2차적인 지하수 오염은 가능성이 매우 희박하나 토양이 높은 농도로 오염되었을 경우에는 지하수에서도 미량의 다이옥신이 검출될 수 있다. 따라서 토양과 지하수에 대해 어떤 것을 어떻게 처리할 것인가에 대한 상세한 사전계획 수립이 매우 중요하다.

우선 다이옥신이란 화학물질을 처리하는 방법으로는 700~800℃의 고열로 소각처리하거나 다양한 고도산화법에 의한 화학적 분해방법 등이 있을 수 있다. 생물학적 분해방법으로는 박테리아에 의한 호기성 분해는 거의 이루어지지 않으나 혐기성에서 염소를 떼어내서 독성을 감소시키는 혐기박테리아가 발견되기도 하였다. 박테리아 대신에 곰팡이에서 나오는 라케이즈 효소에 의해서는 다이옥신이 효과적으로 분해되기도 하나 이들을 이용한 상업적인 처리방법은 아직 개발되지 않고 있는 실정이다. 따라서 환경 중에 다이옥신을 분해하는 균이 매우 제한되어 있기 때문에 다이옥신이 반감기가 매우 길고 환경 중에 오래 잔류하는 것이다. 만약 다이옥신에서 염소를 떼어내어 저염화 다이옥신으로 변환시킨다면 이들을 완전 분해하는 미생물들은 토양 중에 일부 존재하기 때문에 점차적인 분해 제거가 가능하게 된다.



▶ 복합오염지역 정화용 융합공정 개발



▶ 나노-바이오 융합공법에 의한 지하수 오염 처리

오염된 흙에 나노철 섞어 탈염화 유도

칠곡 캠프캐를 미군기지 안이나 밖의 토양과 지하수가 오염되었다고 가정하면 다음과 같은 환경복원 기술이 가능할 것으로 예상된다. 우선 토양의 경우 가장 쉬운 방법은 오염된 토양을 수거하여 고온의 소각이나 오존 등을 이용한 화학적 고도산화방법에 의한 처리를 할 수 있을 것이다. 하지만 이 방법은 엄청난 양의 토양을 수거하여 처리해야 하기 때문에 상당한 비용을 감수해야 한다. 그 이외 광분해 방법이나 아임계상태에서의 탈염화 분해 등 다양한 방법이 사용될 수도 있으나 처리하는 토양의 양과 그에 따른 비용이 문제가 될 것이다.

현장에서 처리할 수 있는 방법으로 일부 식물을 심어 흡수 처리하는 파이토토리메디에이션 방법도 있으나 아직 실용화보다는 연구단계에 머물러 있다. 미생물을 이용하는 바이오토리메디에이션 방법은 고염화 다이옥신을 효과적으로 분해하는 균이 아직 발견되지 않아 불가능하다고 얘기할 수 있다.

자연 상태에서 흙을 걷어내지 않고 현장에서 처리할 수 있는 방법으로는 우선 자연친화적인 촉매인 철을 나노크기로 제조하여 오염된 토양에 섞어주면 고염화의 다이옥신이 저염화 혹은 무염화의 다이옥신으로 변환하게 된다. 그러면 이들 저염화 혹은 무염화 다이옥신들은 비교적 쉽게 미생물에 의해 분해하기 때문에 다이옥신의 처리가 가능해 진다. 물론 이 방법은 장치를 이용하여 수거된 오염토양 처리에도 이용될 수 있으나 지하수 처리에 좀 더 유용하게 쓰일 수 있다.

지하수 흐름에 나노철을 주입하여 그 부근에 나노철 환원

환경을 조성하면 고염화 다이옥신 등의 탈염화를 유도할 수 있다. 그 이후에 후단에서 미생물 처리를 하게 되면 다이옥신의 완전 분해가 가능할 수 있을 것이다. 이러한 나노-바이오 공법은 다이옥신뿐만 아니라 일반 지하수 오염물질인 TCE 나 PCE 등의 처리에도 매우 유용하게 사용할 수 있다. 여기서 나노사이즈의 철촉매를 사용하는 이유는 지하수에 주입할 때 용이하게 분산시킬 수 있기 때문이며, 또한 비표면 증가에 의한 반응성이 매우 커지기 때문이다. 일반 나노철 대신에 다른 금속이나 유기첨가제를 붙여, 표면을 다양하게 개량한 기능성 나노철도 현재 개발 중에 있다.

독성물질은 사전오염 예방이 최선책

결론적으로 에이전트 오렌지로 대표되는 고염제는 월남전 이후에 사용이 금지되었지만 아직도 월남전 참전군인들을 중심으로 그 후유증은 매우 심각하다. 고염제의 부산물인 다이옥신 같은 물질의 가장 무서운 점은 내분비 장애나 발암 같은 독성보다는 오랜 기간 환경과 생체에 잔류하며 계속 축적되고 있다는 데 있다. 그리고 이런 물질들은 pg(10⁻²g) 정도의 아주 작은 양으로 환경에 존재하면서도 강한 독성을 나타내고 있다. 따라서 이렇게 미량으로 존재하면서도 독성이 강한 물질을 정화하고 환경을 복원하는 것은 현대 과학과 공학 기술로도 매우 어렵다. 결국 이러한 독성물질들이 환경에 배출되지 않도록 사전에 철저히 관리하는 사전오염 예방이 가장 효과적인 방법이라고 할 수 있을 것이다. (ST)