

# 환경오염 재해의 책임과 비용 사례 - Tyson's Dump

황대규 (삼윤이엔씨 대표)

## 1. 머리말

도시 주변에서 흔히 발생하는 큰 재해의 하나로써 환경오염 문제가 있다. 도시지역의 환경 재해는 인구가 밀집되어 있어 일반 시민에 대한 피해가 매우 클 수 있고 도시를 구성하는 수많은 시설물들로 인하여 해결이 어렵고 고비용을 소요로 한다. 과거에는 환경오염 물질을 취급하는 주체들이 당장의 비용을 회피하기 위하여 폐기물이나 오염원 물질의 불법투기를 일삼았으나 오랜시간이 경과한 후에 심각한 영향이 발생하고 이를 해결하려면 엄청난 비용이 소요된다. 약 30여년 전 미국에서 행해진 유기성 폐액의 불법투기로 인한 문제, 해결책, 비용 등을 돌아보고 환경오염 문제도 예방이 치료보다 훨씬 낫다는 생생한 사례를 소개하고자 한다.

## 2. Tyson's Dump의 기록

웹페이지 주소 [www.epa.gov/reg3hwmd/super/PA/index.htm](http://www.epa.gov/reg3hwmd/super/PA/index.htm)을 찾아보면 미국 펜실바니아 주의 Superfund 오염지 목록이 실려있다. 거의 끝 부분의 Tyson's Dump를 선택하여 Record of Decision(ROD)을 읽어보면 다음과 같은 5개의 ROD가 나오는데 그 핵심은 다음과 같다.

1EPA/ROD/R03-84/00812/21/198401 - 오염 토양의 처리, 굴착 및 외부매립

2EPA/AMD/R03-88/04503/31/198801 - 오염

토양의 현장처리, 기화추출법

3EPA/ROD/R03-88/06809/30/198802 - 오염 지하수 양수처리, 습지지역

4EPA/ROD/R03-90/10209/28/199003 - 오염 지하수 양수처리, 강과 섬 인근

5EPA/AMD/R03-96/22507/20/199605 - 오염 토양 처리, 포화복토층

주1 - Superfund는 책임소재가 불명확하거나 여러 오염원인자가 복잡하게 얽힌 미국내의 오염지 복원을 위해 미 의회가 1980년에 통과시킨 특별입법의 별칭. 이 법을 근거로 미국에서는 수많은 오염지에 엄청난 비용을 투입 하며 본격적인 복원사업이 시작되었다.

주2 - Record of Decision (ROD)은 Superfund 오염지에 대한 현장조사와 복원방법에 관한 타당성조사를 근거로 정부가 선택하는 복원방법의 선정 기록. 오염원인자가 ROD의 내용을 수행할 의무를 지며 복잡하고 심각한 오염지에서는 흔히 여러 개의 ROD가 나온다.

위의 ROD 목록 중 2호는 1호를 수정한 것이고 (AMD = amended) 5호는 2호를 수정한 것이어서 같은 오염토양 문제로 12년에 걸쳐 세 번의 다른 ROD가 나왔음을 알 수 있는데 이는 EPA가 처리한 업무로는 매우 특이한 사례이다.

Tyson's Dump에서 이와 같이 오랜 기간을 거치며 두 번이나 ROD를 수정한 것은 그만큼 문제해결이 어렵고 심각했다는 뜻도 되는데 이 과정을 간단히 소개하고 그로부터 몇 가지 교훈을 도출해 보고자 한다.

### 3. Tyson's Dump 오염토양 복원대책의 결정과정

Tyson's Dump는 필라델피아 서북쪽 15 mile 지점의 Schuylkill 강변에 위치하고 있는 Superfund 오염지이다 (그림1 참조). 위에 소개한 ROD를 전체적으로 풀이하며 오염지의 배경과 복원관련 역사를 간단히 요약하면 다음과 같다.

주3 - 아래의 내용은 환경복원에 대한 인식이 없던 시대의 일부 내용을 재구성한 부분이 있어 앞뒤가 맞지 않은 점도 있으며 정부의 공식적인 ROD의 내용도 공사비 추정액 등에서 현실에 맞지 않아 필자가 알고있는 내용을 가미하여 조정하였음.

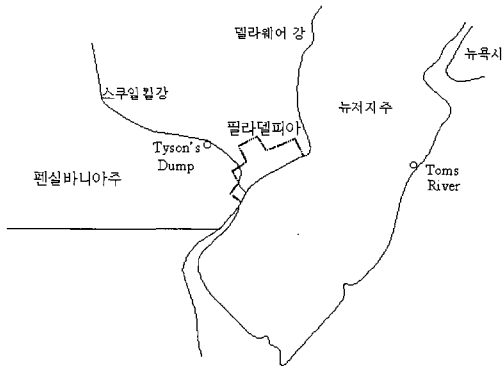


그림1. Tyson's Dump 위치도

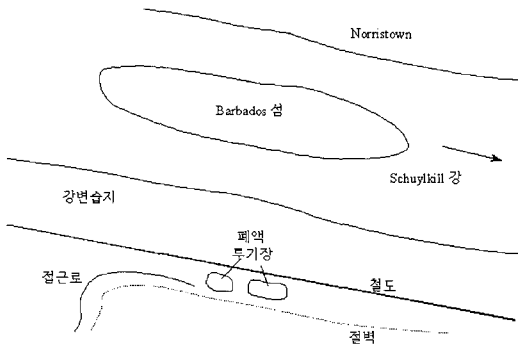


그림2. Tyson's Dump 주변도

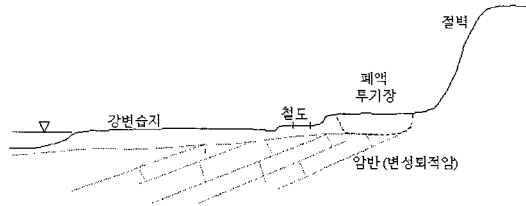


그림3. Tyson's Dump 단면도

● Tyson's Dump 주변의 상황과 현장의 단면은 그림2, 그림3과 같으며 1960년 경에 현장에는 채석장 운영의 결과로 큰 구덩이가 여러 개 있었다.

● 1962 - 1973 기간 중 Tyson이라는 정화조 청소업자가 채석장 구덩이에 불법으로 정화조 오니를 투기하기 시작하고 점차 인근 화학공장에서 수거한 액상 화학 폐기물도 투기하였는데 다량의 폐액이 Toms River (그림1) 소재의 어느 화학공장에서 배출된 것이었다. 투기된 구덩이들의 전체면적은 약 16,000 m<sup>2</sup>.

● 1973 - 주정부가 투기장 폐쇄명령을 내려 폐액을 제거하고 성토복원

● 1983 - Superfund 입법으로 오염지복원이 본격화 되자 인근주민이 악취와 폐액문제를 고발. Tyson은 구속 수감되고 EPA가 응급조치로 추가된 매우기를 실시 (이 응급조치로 구덩이 안의 흙 33,000 m<sup>3</sup>가 전부 폐액으로 오염되어 차후에 이를 처리해야 하는 문제를 야기하게 된다). EPA 주도로 현장조사 및 대책수립 착수. 토양을 오염시킨 화학성분은 주로 chlorinated benzene, toluene, xylene, 1,2,3-trichloropropane (약칭 TCP) 등이었으며 특히 그 양과 독성에서 TCP가 가장 심각한 오염원으로 밝혀짐.

● 1984 ROD1 - 지하수 오염문제가 심각함이 드러나자 EPA는 지하수 문제를 따로 분리하여 계속 조사 및 대책수립을 하기로 하고 우선 구덩이의 오염토양 문제에 대한 대책을 결정. 결정의 핵심은 오염토양을 굴착하여 인가된 유해폐기물 매립시설로 수송 매립. 당시 사업비는 \$15,000,000 정도로 추정.

● 1986-87 - 오염원인자 측에서 자체타당성 조사

를 수행. 굴착, 수송에 따른 2차 오염 가능성과 고비용을 이유로 당시 신기술로 시장에 등장한 기화 추출법을 (Soil Vapor Extraction, SVE) 대안으로 제시. SVE의 예상 사업비는 약 \$5,000,000이었고 예상 공사기간은 2년.

- 1988 ROD2 - EPA가 SVE 제안을 수용하여 ROD2 채택 발표.

- 1989-92 - SVE의 설치, 시운전을 거쳐 1988년 11월에 정상가동 개시. 이후 4년간 약 100톤의 오염물질을 추출. 여러 가지 성능개선 대책의 실시에도 불구하고 점차 추출이 어려워져 토양을 기준치 이내로 처리하는 것이 불가능함이 판명됨. 그간 약 \$22,000,000의 비용 발생.

- 1993 - 기다리다 못한 EPA에서 오염원인자에게 다시 타당성 조사를 통하여 확실한 대책을 수립하라는 명령을 내리고 그 당시 사업비 \$50,000,000 정도가 예상되던 굴착 및 조각을 강력히 유도.

- 1995 - 오염원인자가 타당성조사를 거쳐 제시한 대안은 포화복토층으로 (saturated soil cover) 예상 공사비는 \$2,000,000 정도.

- 1996 - EPA에서 포화복토층을 공식적으로 수용하는 ROD5 발표. 오염원인자는 곧 이어 설계 및 시공에 착수.

주4 - ROD3와 ROD4는 지하수 오염대책으로 각각 1988년과 1990년에 나왔음.

위의 포화복토층 대안은 오염원인자 측의 의뢰로 필자가 제시한 새로운 대안이었다. 그 당시로서는 엉뚱하고 무모하기까지 한 이 대안에 대하여 초기에는 오염원인자 측에서조차 상당한 반대와 의구심을 가졌기 때문에 타당성 보고서를 EPA에 제출하면서 필자는 EPA가 이 제안을 수용할 가능성을 30%도 되지 않을 것으로 예상했다. 기술적으로는 충분히 자신이 있었으나 이미 한번 오염원인자 측의 SVE 제안을 받아들인 결과로 10년의 세월을 허비한 EPA 담당자들이 또다시 전에 없던 새로운 시도를 수용할 것 같지가 않았기 때문이었다. 그러나 결과는 수차의 협의 끝에 무리없이 수용하는 것으로 결론이 났다. 포화복토층은 도대체 무엇이며 어떻게 EPA가 기대했던 조각대

안에 비해 단지 4% 정도의 비용으로 문제를 해결했는가?

#### 4. 포화복토층의 배경과 논리

포화복토층의 타당성을 이해하기 위하여는 먼저 Tyson's Dump의 지하수 문제와 토양오염에 의한 위해도 특성을 이해할 필요가 있다.

##### 가. 지하수 문제와 ROD3

1988년에 SVE가 오염토양 대책으로 선정될 무렵에 이미 지하수 오염에 관하여도 상당한 조사가 이루어져 있었다. 현장조사 결과에 의하면 일대의 지하수가 주로 toluene, xylene 등의 휘발성 유기물로 (VOCs = volatile organic compounds) 오염되어 있었고 암반에서는 TCP가 DNAPL (Dense Non-Aqueous Phase Liquids) 형태로 존재하고 있음을 확인하였다.

주4 - DNAPL은 물과 잘 섞이지 않으면서도 물보다 비중이 커서 통상 지하수의 유동법칙과 다르게 아래로 서서히 이동하는 특성을 가진 액체를 통칭하는 용어이며 특히 염소화합물 유기성 용매가 대부분 DNAPL이며 독성도 높아 문제가 되고 있다.

강물의 오염상태는 거의 감지되지 않았는데 그 이유는 유량에 의한 희석효과와 상류 탄광지대에서 흘러 내려 침전된 석탄가루에 의한 흡착효과로 추정되었다. 독성과 양적인 면에서 가장 심각한 오염원은 준 휘발성인 TCP로서 TCP는 수용성이 낮아 DNAPL로 이동은 하면서도 총량이 쉽게 소진되지 않으며 단지 암반의 균열을 따라 이동하며 균열표면에 묻어서 소진되어야 이동이 중단되는 특성을 보였다. 그 결과 같은 투기장에서 출발했다라도 지하수 오염은 주로 수용성이 높은 VOC 성분에 의한 것이었고 TCP의 농도는 비교적 낮았으며 TCP의 대부분은 DNAPL 형태의 암반오염을 유발하고 있었다. 따라서EPA는 1988년에 내놓은 ROD3에서 일단 폐액 투기장 하류방면의 철로변과 습지 여러 곳에 양수정을 설치하여 오염지하수를 양수하여 VOC를 대상으로 기화법과 (air stripping) 활성

탄 흡착법으로 처리 방류하도록 하였다. 더하여 DNAPL 문제에 대한 더 넓은 범위의 조사와 후속대책 수립을 오염원인에게 명령하였다. 계속된 현장조사 결과를 보면 TCP는 지하 암반층을 오염시키며 강바닥 아래의 암반층을 통해 더 깊이 더 북쪽으로 이동 중임이 밝혀졌다 (그림4, 그림5 참조).

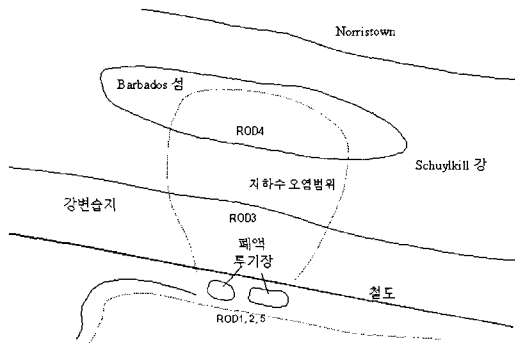


그림4. ROD 적용범위

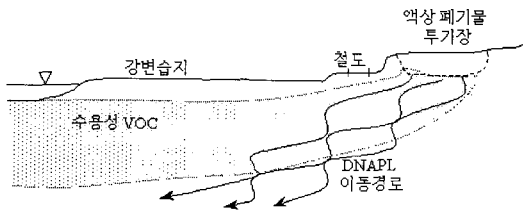


그림5. 지하수 오염의 특성

나. 오염토양에 의한 위해도와 확산

오염토양에 복원대책이 필요한 근본적인 이유는 인근주민의 건강에 대한 위해도이며 가장 위해도가 높은 경로는 기화된 오염성분이 호흡을 통해 체내로 흡수되면 이로 인한 발암확률이 높다는 점이었다. 오염토양에서 기화되어 주변 대기로 퍼지는 오염물질은 적절한 공법으로 쉽게 차단이 가능할 것 같으나 사실은 그렇지 않다. 유기성 오염물질의 분자는 통상 사용하는 차수시트를 통하여도 쉽게 분자확산에 의하여 이동하며 또한 점토층을 통하여도 공극의 공기를 통

한 확산으로 쉽게 이동한다. 이처럼 기화와 확산에 의한 오염물질의 이동으로 인근주민에 대한 위해도가 높으므로 EPA에서는 오염원인 토양을 전부 굴착하여 소각하여야 한다는 의견이 우세하였다.

유기성 오염물질의 분자는 공기나 물에서 농도가 높은 곳에서 낮은 곳으로 분자확산에 의하여 퍼져 나간다. 확산성의 정도는 확산계수로 나타내는데 통상 휘발성 유기화합물의 공기 중 확산계수는  $1 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{sec}$  정도인데 반하여 수중에서는  $1 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{sec}$  내외로서 공기 중 확산계수의 1/10,000 수준이다. 다시 말하면 확산에 의한 이동은 공기 중에서는 빠르고 상당량에 달할 수 있으나 수중에서는 매우 느리고 이동량도 매우 적다. 지하수 오염 문제의 해석에서 분자확산에 의한 영향을 통상 무시하는 이유가 바로 이 때문이다.

물을 통한 확산은 크게 문제가 되지 않으므로 확산을 방지하는 대안은 바로 오염토양의 경계를 물로 포화시키면 된다고 볼 수 있다.

다. DNAPL 문제와 ROD4

앞서 Tyson's Dump에 투기된 TCP가 DNAPL 형태로 암반층을 통하여 더 깊이 더 멀리 북쪽으로 이동하고 있음을 설명하였다. 따라서 1990년에 나온 ROD4는 당시의 유일한 대안으로 Barbados 섬과 Norristown 쪽으로 더 깊은 관정을 설치하여 계속 DNAPL의 범위를 확인하며 지하수를 양수하여 낮은 농도로나마 TCP를 제거하여 오염원의 확대를 저지하는 것이었다. 더하여 장기적으로는 암반의 DNAPL을 처리하는 획기적 기술의 출현을 희망할 수 밖에 없었다. 1990대 중반에 이 문제를 근본적으로 해결할 수 있는 현실적인 기술은 사실상 존재하지 않았으며 당대 최고수준의 전문가들의 공동된 견해도 이 점에 동의하였다. 전문가들의 견해는 넓은 범위에서의 양수 처리를 아마도 100년 이상 계속해야 할 것이라는 참으로 암담한 결론이었다.

라. 토양오염 대책 - 포화복토층

지하수 쪽의 이 결론은 한편으로 오염토양에 대하

여는 고비용의 소각을 피할 수 있는 새로운 대안이 가능함을 암시하고 있었는데 그 논리는 다음과 같다.

- DNAPL과 지하수 문제는 토양오염 지역의 하류에서 사실상 영구적으로 지하수의 양수처리를 요구한다.

- 오염토양에서 지하수로 흘러드는 오염물질은 하류지역으로 이동하므로 이 지하수 양수처리 시설에 의하여 집수 처리된다. 즉, 오염토양의 오염물질은 적극적으로 제거하지 않아도 결국 하류에서 차단 제거된다.

- 오염토양에서 기화된 유기성 화학물질을 호흡하면 큰 위해성이 있으나 이는 오염토양 층의 표면을 포화상태로 유지하면 거의 방지된다.

- 포화된 표면에서는 물이 아래로 흘러 오염토양층으로 흘러들 것이다. 아래로 흐르는 물의 속도가 위로 이동하는 오염물질의 확산속도보다 크면 확산을 원천적으로 차단하고 호흡에 의한 위해도를 완전히 제거할 수 있을 것이다.

### 5. 포화복토층의 기술적 해석

확산에 의한 오염성분의 상향이동을 방지하기 위한 포화복토층은 그림6과 같은 구조로 되어 있고 각층의 역할은 다음과 같다.

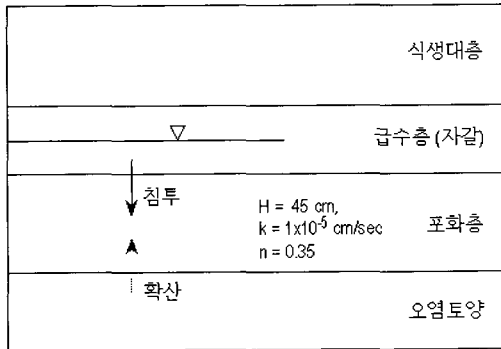


그림6. 포화복토층 개념도

식생대층 - 토양의 유실이나 먼지발생을 방지하고 경관을 위하여 잔디 식재

자갈층 - 아래의 포화층에 충분한 물을 공급하기 위

한 급수층

포화층 - 위의 급수층에서 공급되는 물로 인해 포화된 실트 섞인 모래층

오염토양 - 현장의 오염토양으로 실트섞인 모래

포화층과 오염토양의 토질특성은 유사하나 포화층의 투수계수가 오염토양의 투수계수보다 약간 낮도록 한다. 이제 포화복토층을 통하여 아래로 흐르는 침투수의 속도를 구해 보자.

$$\text{투수계수 } k = 1 \times 10^{-5} \text{ cm/sec,}$$

$$\text{공극율 } n = 0.35, \text{ 동수구배 } i = 60/45$$

$$\text{침투수의 속도 } V = ki/n$$

$$= 3.33 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$$

$$= 2.9 \text{ cm/일}$$

확산에 의한 오염물질의 이동과정은 Fick의 제2법칙의 1차원 해로부터 얻어지는 다음의 확산공식으로 나타난다.

$$C(x,t)/C_0 = \text{erfc}[0.5X/(D^*t)^{0.5}]$$

여기서  $C(x,t)$  = 시간  $t$ 일 때 오염원에서의 거리  $x$ 에서의 농도이며 그림7과 같이 표시되고,  $C_0$  = 오염원에서의 농도,  $\text{erfc}$  = complementary error function,  $D^*$  = 포화된 토양을 통한 유효 확산계수 ( $=\omega D$ ),  $D$  = 오염물질이 수층을 통해 확산될 때의 확산계수,  $\omega$ 포화된 토양의 토립자 효과를 고려한 보정계수로 자갈에서 0.4내외, 모래에서 0.3내외, 실트에서 0.15내외, 점토에서 0.05내외이다

이제 위의 확산공식을 이용하면 확산속도를 구할 수 있다. 먼저 확산속도는 곧 오염범위의 경계선이 이동하는 속도임을 유의하여 오염농도가 0에 충분히 가까운 곳을 경계선으로 보면 되므로 편의상  $C(X,t)/C_0 = 0.01$ 인 곳을 경계선으로 선택한다 (그림7 참조). 적절한 거리  $X_1$ 과 그보다 약간 큰 값  $X_2$ 를 선택하고 확산공식에서  $t_1$ 과  $t_2$ 를 구하면 오염경계선의 이동속도는  $(X_2 - X_1)/(t_2 - t_1)$ 가 된다.

포화층의 두께 = 45cm이므로 중간깊이에서의 확산속도를 구하기로 하면  $X_1 = 23 \text{ cm}$ ,  $X_2 = 24 \text{ cm}$  TCP의 수층 확산계수  $D = 7.8 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{sec}$  포화층을 통한 유효확산계수는  $D^* = 0.15D = 1.17 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{sec}$  Complementary error function

표로부터  $C(X,t)/C_0 = 0.01 = \text{erfc}(1.825)$   
 즉,  $0.5X/(D*t)^{0.5} = 1.825$ 이고 이로부터  
 $t = (X/3.65)^2/D * X1 = 23\text{cm}$  일때  
 $t1 = 3.4 \times 10^{-7} \text{ sec} = 394 \text{ 일}$   
 $X2 = 24\text{cm}$  일때  
 $t2 = 3.7 \times 10^{-7} \text{ sec} = 428 \text{ 일}$   
 따라서 확산속도는  
 $1\text{cm}/(428-394)\text{일} = 0.03\text{cm/일}$

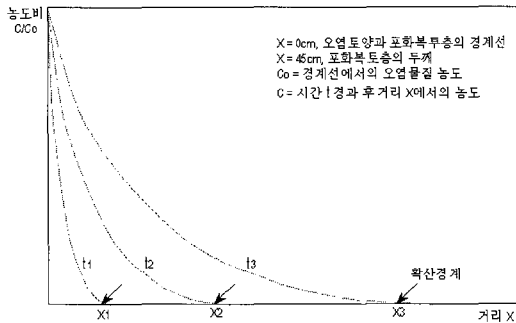


그림7. 1차원 확산과정의 도해

위에서 먼저 구한 침투수의 속도는 2.9cm/일이었으므로 이는 중간깊이에서 위로 향하는 확산속도의 거의 100배가 됨을 알 수 있다, 따라서 확산의 경계선이 중간깊이에도 이를 수 없음을 의미하며 위의 과정을 반복해 보면 확산경계는 포화층의 바닥경계선에 매우 가까움도 확인할 수 있다. 결론은 포화복토층이 충분한 안전도로 오염물질의 대기확산을 완전히 차단할 수 있다는 것이다. 이 결과와 다른 여러가지 평가결과에 근거하여 EPA도 이 방법의 타당성을 인정하고 포화복토층을 무리없는 대안으로 받아들이게 되었다.

## 6. 오염원인자의 책임

여기에 소개한 사례를 보면 오염원인자에 대하여 두 가지 가정을 할 수 있다.

첫째는 이 오염원인자는 환경에 엄청난 위해를 초래한 악랄한 기업일 것으로 보이며 둘째는 그 많은 비용을 부담하고도 망하지 않았다면 엄청나게 돈을 많이

버는 기업인 것으로 보인다. 첫째 가정은 완전히 틀리고 둘째 가정은 절대적으로 맞다. 이제 오염원인자에 대한 사실을 알아 보자.

스위스에 Ciba-Geigy라는 회사가 있다. 제약 및 특수화학약품 분야에서 유럽을 거점으로 세계적 기업으로 발돋움하다가 1970년대에 사업지역을 확장하기로 결정하였다. 유럽 지역을 넘어 사업을 확장한다면 거대시장 미국이 일순위이다. 당시 미국에는 듀폰, 다우 케미칼 등 쟁쟁한 회사들이 있었으나 전략적 제휴나 거대기업간의 인수합병은 거의 생각할 수 없었던 시절이므로 미국내의 중규모 화학공장들을 인수했는데 이 전략은 돌이킬 수 없는 실수였다.

Ciba-Geigy는 뉴저지주의 Toms River와 알라바마 주의 MacIntosh에 위치한 두개의 유기화학공장을 인수하였다. 이 당시에는 미국에서도 환경오염에 대하여 인식이 부족하던 때라 대부분의 독성폐기물을 그냥 땅에 묻거나 저류지나 심층 주입법으로 땅속으로 침투시키고 그도 아니면 불법투기하는 업자에게 떠넘기면 밤중에 으스스한 곳으로 신고 나가 버리기가 다반사였다. Ciba-Geigy가 인수한 공장들은 이미 이 분야에서 큰 원죄가 있었으나 이런 것은 크게 관심사가 되지 않았던 시절이었다. 이들 공장을 인수한 후 얼마 지나지 않아 미국정부가 폐기물에 의한 토양지하수 오염에 대한 근본적 대책으로 두개의 입법을 (먼저 1976년에 RCRA, Resource Conservation and Recovery Act와 앞서 언급한 Superfund 법) 통하여 본격적인 환경복원을 강제하였다. 그 결과 이 분야에 엄청난 사업비가 투입되고 상당 수의 기업이 도산하거나 공장을 폐쇄하게 되었다.

Tyson's Dump에 투기된 유해폐기물의 대부분이 바로 Ciba-Geigy가 공장을 인수하기 전에 Toms River 공장에서 발생하여 투기된 것이었고 Macintosh 공장도 성격은 다르나 환경복원 사업에 1억불 이상이 투입되어야 할 처지였다. 1990년대 중반의 Ciba-Geigy는 세계 각국에서 연간 10억불 내지 20억불의 수익을 내는 거대알짜 기업이었으나 미국에서 만든 한푼도 벌지 못하면서 매년 수천만불을 환경복원에 쏟아 붓고 있었다. 미국으로 사업확장을 한 결

과로 미국의 기업들이 망쳐 놓은 환경을 복원하기 위해 미국 바깥에서 벌어들인 엄청난 돈을 쏟아 붓는다는 것은 정말 아이러니라 하지 않을 수 없다. 더욱이 미국의 Superfund 법이라는 것이 매우 고약하게 만들어져 Ciba-Geigy가 미국에서 사업을 포기하고 철수해도 오염지 복원은 계속하지 않을 수 없게 되어 있다. 앞서 지하수 문제에서 언급한 바와 마찬가지로 Tyson's Dump의 DNAPL 대책은 앞으로 50년이나 100년을 계속해도 끝날지 말지 알 수 없으며 매년 수천만불을 투입해야 하니 참으로 기막힌 일이다.

### 7. 사례가 주는 교훈

여기에 소개한 사례로부터 지하수와 토양오염에 관

한 몇 가지 교훈을 도출해 볼 수 있는데 이를 요약하면 다음과 같다.

- 오염지 복원은 초기의 예상보다는 훨씬 긴 시간과 고비용이 소요된다.

- 환경복원 비용은 오염예방 비용에 비하여 수십배나 수백배가 더 높다.

- 어려운 문제도 창의적 발상으로 도전하면 놀랄 정도로 간단하고 경제적인 방법이 나오기도 한다.

- 미국은 첨단 기술과 풍부한 재원으로 오염지 복원 문제를 잘 처리하는 것으로 알겠지만 이것은 매우 큰 착각이다. 사실은 필요 없는 곳에 엄청난 예산낭비를 하는 시행착오를 겪어 왔으며 특히 법률비용이 너무 높다.