

미국의 시행착오에서 배우는 폐광 환경복원 최적화 기법

황대규¹ · 이진용²¹삼윤이엔씨 · ²지오그린21

요약문 : 폐기물과 오염물질 투기로 인해 발생된 오염지의 복원은 1980년대 초반 미국이 본격적으로 시도하여 현장조사, 위해도 평가, 타당성 검토의 3단계를 거쳐 복원대책을 수립하는 정형이 이루어졌다. 이 정형에서는 먼저 현장조사로 오염상태에 대한 자료를 수집하고 위해도 평가로 오염도가 인체와 환경에 미치는 위해도를 정량화하며 타당성 검토에서 위해도를 제거하기 위한 각종 대안을 검토하여 최종안을 선정한다. 이 과정 자체는 합리적이었으나 여러가지 시행착오를 거치며 과잉대책이 남발되고 사업효과도 미흡하여 점차 예산낭비의 대표적인 사례로 비판이 제기되었다. 시행착오의 가장 큰 기술적 원인은 위해도 평가와 별개로 타당성 검토를 수행하며 비현실적인 완벽복원을 추구한 탓이며 이를 극복하려는 최적화 기법이 90년대 초반에 소개되었다. 이 최적화기법은 타당성 검토단계에서 각 대안의 잔류 위해도를 산정하고 해당대안의 비용과 비교하여 위해도를 허용수준으로 줄이는 최소비용 대안을 발견하는 방법이다. 이 최적화기법을 실제 프로젝트에 적용한 결과 복원대책 수행에 기대 이상의 비용절감을 이루고 정부의 수용도도 높았다. 특히 정비대책에 현장조건의 특성을 활용하는 창의적 대안을 도입하면 효과를 극대화 할 수 있는 바 두 가지 사례를 소개하였다. 앞으로 상당한 투자가 예상되는 폐광오염 문제에도 이 기법을 적용하면 비용과 효과를 최적화할 수 있을 것으로 기대되어 그 모델을 제시하였다.

1. 서론

100년 이상의 대규모 산업화 역사를 가진 미국에서는 폐기물과 오염물질의 투기로 인해 발생된 각종 환경문제가 심각함을 인식하고 1970년대 후반부터 유해 폐기물에 의한 토양과 수질 오염문제의 근본적 해결을 시도하였다. 1976년 RCRA (Resource Conservation and Recovery Act) 입법으로 시작된 정부시책은 1980년의 CERCLA (Comprehensive Environmental Response, Compensation and Liability Act, 별칭 Superfund) 입법으로 추진력을 얻어 1990년대 중반까지 매우 활발하게 수행되었다.

미국의 정부주도 정책은 어떤 면에서 상당한 성과를 거둔 것도 사실이나 투입된 비용과 시간에 비하여 달성된 효과가 미미한 것으로 판단되어 90년대 초반부터는 상당한 비판에 직면하게 되었다. 이것은 초기의 목표설정이 비현실적이었고 수많은 시행착오를 겪은 결과이며 그 이후 점차 오염지 대책에 대한 제도수정이 이루어졌다.

우리나라에는 경제성이 없어 폐쇄된 수많은 폐광이 각처에 산재하고 있는데 폐광에서 기인하는 각종 환경문제가 심각한 것으로 인식되어 이의 해결에 상당한 투자를 필요로 하고 있다. 폐광문제 해결의 기술적, 정책적 접근방법은 과거 미국에서 겪은 Superfund 오염지 문제와 매우 유사하다. 따라서 미국에서 겪은 문제점과 시행착오를 검토하여 한국의 현실에 맞는 폐광정비 대책의 기술적 전개방향을 제시하고자 한다.

2. 미국의 경험

2.1 입법 및 집행과정

방대하고 역사가 깊은 산업기반을 가진 탓으로 미국의 토양오염원 역시 대규모이고 다양하다. 대표적인 오염원으로는 광업, 목재처리, 석유 및 화공, 석탄, 불법 폐기물 처리 및 매립, 군기지, 방위산업, 제약/농약, 기계공업, 반도체 등이다. 1970년대부터 토양오염의 문제가 심각함을 인식하고 RCRA 및 Superfund 양대 입법과 추가입법 및 수정법안을 통해 문제해결을 시도하였다.

RCRA는 운영중인 시설, 즉 책임소재가 확실한 시설의 오염원을 규제하고 오염문제를 해결하기 위하여 1976년에 입법화 되어 점차 강도를 높여가며 시행되었다. 1980년대 중반부터는 이 법의 시행이 점차 주정부로 이관되어 안정적으로 시행되고 있다. RCRA 법안은 비교적 성공한 것으로 평가되는데 그 이유는 책임이 시설 소유자나 운영자에게 있어 오염문제의 해결을 하지 않고는 시설 운영이 불가능하였기 때문이다.

Superfund 입법은 1980년 나이아가라 폭포 인근의 Love Canal 화학폐기물 매립지의 오염사태가 언론에 집중 부각되자 국회가 대응책으로 내어 놓았다. 이 법안은 책임소재가 불분명하거나 책임자가 해결을 감당하기 어려운 경우 우선 정부자금으로 문제해결을 추진하도록 입법화되었다. 이 법안은 초기비용 마련을 위해 석유 및 화학제품에 특별세금을 부담시키고 본격적인 비용을 부담시킬 제도적 장치로 아무런 탈법사실이 없는 기업이나 개인을 무리하게 오염원인자로 끌어들이며 비용 부담을 강요하였다. 특히 오염원인자들이 비용문제에 공동 무한책임을 지도록 하여 과거에는 합법적인 행위도 본법의 소급적용으로 불법이 되고, 일사부재리의 법리를 정면으로 위배하는 내용을 담고 있었다. 그 결과 오염여부를 모르고 토지를 취득한 매입자는 물론 토지거래에 용자를 제공한 은행에까지도 무한책임을 물었으며 이 법안 시행에 많은 문제점이 부각되자 전문가들에 의해 미국사상 최악의 법으로 지목되기도 하였다. 그림 1은 Superfund 오염지 복원과정을 보여준다.

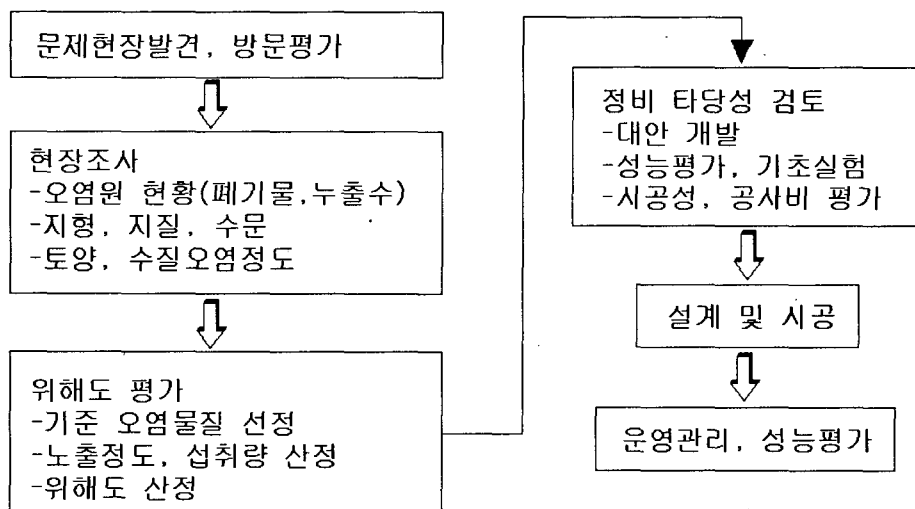


그림 1. 오염지 복원의 일반적 순서

2.2 일반적 문제점

Superfund 법에 의한 오염대책의 수행과정에서 노출된 문제점들은 다음과 같다.

- 미국은 법치사회로서 문제해결을 법에 의존하려는 인식이 강하여 환경문제에도 복잡하고 까다로운 법의 해석과 대응책의 강구에 수많은 변호사들이 대거 개입하게 되었다. 복잡한 기술 문제와 막대한 금전적 피해가 얽혀있는 문제를 관련자들을 대변하는 수많은 변호사들이 해결하려 한 결과 소모적 비용과 사업지연이 일반화되었다.
- 오염지의 토양 및 지하수 정화사업이 진행됨에 따라 예상보다는 훨씬 높은 비용과 장기간이 소요됨을 알게 되었다. 이는 초기에 충분한 현장경험이 없이 이론에만 근거하여 낙관적이고 야심적인 목표를 설정하여 사업계획을 수립한 탓이다.
- 사업추진 과정에서 정부가 깊이 개입한 결과로 절차 및 행정비용이 많이 발생하고 사업추진이 지연되었다. 기술적인 문제조차 지나치게 세부적으로 규정하여 (USEPA, 1988) 요식행위를 위해 막대한 시간과 비용이 소요되고 기술자의 창의성이나 현장특성을 고려하기가 어려웠다.
- 1980년대 후반에 접어들며 이 분야 기술자의 수요가 폭발적으로 증가했으나 공급은 제한되어 사업수행 인력의 자질문제가 발생하였다. 어느 정도 경험을 축적한 기술자들은 프로젝트 관리에 매달려 경험을 활용하지 못하고 중요한 기술적 검토 및 평가업무를 경험이 부족한 초보자가 담당하여 능률적인 사업수행을 저해하였다.
- 가장 중요한 문제점은 비현실적인 위해도 평가와 근시안적인 타당성 검토로서 이에 대하여는 2.3과 2.4에서 더욱 자세히 설명하였다.

2.3 위해도 평가의 문제점

위해도 평가는(Risk Assessment) 오염물질이 공중보건에 미치는 영향을 정량적으로 평가하는 기법으로 이 결과는 해당 오염지에 대한 대책수립 여부의 근거가 되고, 그 대책의 강도와 총 사업비에도 절대적인 영향을 미친다. 위해도 평가의 순서는 다음과 같다.

- 현장의 오염농도 조사결과와 오염물질의 독성자료 등에 근거하여 공중보건에 영향을 미칠 수 있는 주된 오염물질을 선정한다.
- 해당지역의 생활여건에 따라 지역주민이 오염물질에 노출되는 경로를 설정하고 그에 따른 오염물질의 섭취량을 추산한다.
- 오염성분의 독성자료와 섭취량에 근거하여 인체에의 위해도를 숫자로 표시한다.

위해도는 발암성과 일반독성 두 가지로 나누어 평가하고 그 결과는 발암성의 경우 일생 중의 발암확률로 표시하고 독성은 인체에의 궁극적 유독성 유무로 표시한다. EPA는 (미국 환경청) 이 과정의 객관성을 위하여 상세한 평가방법을 지침서로 안내하였지만 현실에서는 많은 자료가 계속

축적되고 기법 또한 보완되었다.

위해도 평가가 오염지 문제의 심각성을 수치화하는 과학적인 접근 방법이지만 그 결과에 대한 사회경제적 의미를 이해하기 전에 행정적 요구에 의하여 무리하게 적용한 결과 낭비성 오염대책의 결정적 이유가 되었다. 위해도 평가기법의 두 가지 가장 큰 문제점은 근거가 희박한 발암성 평가와 지나치게 보수적인 섭취량의 산정 방법이다. 어떤 화학물질의 발암성 여부는 현실과 가까운 조건에서 인간을 대상으로 평생동안 미량의 오염물질을 섭취시켜 실험으로 확인하는 것은 불가능하다. 따라서 생쥐에 대한 일정기간의 대량투여 실험결과로 인체영향을 추정하는데 전문가들은 최소안전치 개념을 무시한 이 방법이 적절치 않은 것으로 본다. 가령 100도의 끓는 물에 생쥐를 10초 동안 담궈서 죽는다는 실험결과로 40도의 뜨끈한 물에 사람을 24시간 담그면 죽을 것이라고 볼 수는 없다는 것이다. 또한 섭취량의 추정에 이중 삼중의 보수적 가정을 도입하는 결과로 섭취량을 과다 계산하여 사실상 안전한 환경에서도 위해도가 높게 계산된다는 점이다.

이 결과로 현실에서는 주민 보건상의 위해가 거의 없는 경우에도 과장된 시나리오에 의해 발암 가능성이 조금이라도 있으면 극단적인 대책이 수립되고 막대한 비용이 투입되었다. 참고로 현재 미국의 암 발병율은 정상인의 경우 3명당 1인으로 접근하고 있으며 오염지로 인한 발암 확률은 1,000,000명당 1인 수준이 넘으면 대책을 수립해야 하도록 되어있다.

2.4 타당성 검토과정의 문제점

위에서 설명한대로 위해도 평가방법이 너무 보수적이라 그 결론은 항상 위해도가 기준치 (예: 발암 확률 1/1,000,000 이상) 이상이 되어 복원대책을 필요로 하므로 타당성 검토단계로 넘어간다. 타당성 검토의 일반적인 순서는 다음과 같다.

- 현장조사와 위해도 평가 결과에 근거하여 오염지의 정비목표를 설정한다.
- 목표 달성을 위한 구체적인 기술과 요소공정을 찾는다.
- 구체적 기술들을 결합하여 전체현장에 적용 가능한 여러 대안과 개략 설계안을 준비한다.
- 각 대안의 효율성, 시공성, 비용을 비교 평가하여 타당성이 높은 몇 개의 대안을 선정하고 상세한 평가를 실시한다.
- 평가결과를 비교하여 최종대안을 선정한다.

이 타당성 검토과정 역시 합리적이지만 현실에서는 여러 가지 문제점이 있었다. 먼저 수요에 비하여 전문인력이 부족하여 유관분야에서 상이한 배경을 가진 기술자들이 대거 투입되어 체계적인 업무수행이 어려웠다. 그나마 경력기술자는 업무관리에 매달리고 주로 초보기술자가 평가와 보고서작성 업무를 수행하였다. 그 결과 현장특성을 반영하는 창의적인 대안수립은 찾아볼 수 없었고 대개는 유사한 종전의 보고서를 편집하여 보고서를 작성하는 수준이었다.

가장 큰 문제는 여러 대안들 중에서 최선의 대안을 판별하는 객관적 기준이 없어 정성적이고

막연한 근거로 최종안을 선정한 점이다. 통상 각 대안의 성능과 비용이 비례하므로 고비용의 대안일수록 성능이 좋을 것으로 인식되나 성능의 정량화와 객관화가 결여된 상태에서 점차 고비용 대안이 등장하고 선택되는 추세가 형성되었다. 특히 초기 몇 년간의 Superfund 사업의 수행결과 상당수의 오염지가 차단형태로 정비되고 있음을 발견한 국회가 1984년에 법률을 강화하여 가능하면 오염원을 처리하여 무해화하는 방향으로 정비할 것을 규정하여 이 추세가 더욱 가속화 되었다. 이상적이긴 하나 처리에 의한 무해화라는 목표는 여러가지 이유로 현실과는 동떨어진 것이었다.

- 특정기술은 특정공정에서 발생하는 특정 오염물질에 적용하도록 개발되므로 수많은 무기성 유기성 오염물질이 혼재하는 Superfund 오염지에 효과적인 기술은 사실상 존재하지 않았다.
- 특정기술의 적용성을 판단하기 위해 상당수준의 실험과 Pilot 운영을 필요로 하는데 이에 소요되는 비용이 높고 오랜 기간이 필요하였다.
- 처리기술이 어느 정도의 효과를 거두어도 엄격한 정화목표에 비하여 처리수준이 미흡하여 처리 후 다시 다른 처리공정을 추가해야 되고 그것도 부족하여 결국 현장차단도 동원하였다.
- 간혹 여러 오염물질을 처리할 수 있는 단일 처리공정이 제안되기도 했으나 단가가 너무 높아 적용의 범위가 제한되었다.
- 지하수의 경우 오염원의 범위와 특성으로 인해 양수처리에 장기간이 소요되고 때로는 반영구적인 양수처리가 불가피하여 앞으로의 연구과제로 남기는 사례도 발생하였다.

이러한 이유로 오염지 정비의 비용이 폭발적으로 증가하면서도 단기간에 확실한 무해화 처리는 이루어지지 않는 경우가 대부분이었다.

2.5 문제점의 비판과 정책변화

결국 Superfund 에 의한 오염지 대책은 문제 아닌 문제에 너무 많은 비용을 쏟아 부으며 뚜렷한 성과도 거두지 못하고 있었다. 문제점의 근본 원인은 기술력과 경제성의 현실에 비하여 목표설정이 너무 야심적이었기 때문이며 그 배경에는 환경주의자의 영향, 사이비 전문가, 언론의 영향(부정적이고 부정확한 보도), 순진한 대중, 정치적 이용, 관료주의, 영리주의 등 어느 국가 어느 사회에서나 발견되는 요인이 숨어 있었다. 이러한 문제점과 불합리성은 1980년대 말부터 점차 공감대가 확산되고 1990년대 초반에는 드디어 전통적으로 환경규제를 지지하며 환경 측면에서 산업계를 적대시하던 주요 언론에서도 지나친 환경규제와 고비용 저효율 오염대책을 비판하기 시작하였다. 그 예를 요약하면 다음과 같다.

- The Wall Street Journal (3/15/91) "EPA 주도하의 Superfund 프로그램은 엄청난 비용에도 불구하고 효과가 미미하여 목표달성은 사실상 불가능. 차라리 문제예방에 주력해야..."
- Time (3/9/92) "미조리주 타임즈 비치의 다이옥신 문제는 일부지역의 시민이주까지 단행한 심각한 문제였는데 최근의 연구로 별 위험이 없는 것으로 밝혀져 이는 지나치게 보수적이고

비현실적인 EPA의 위해도 평가 때문이고 시민들만 고통과 혼란에 처하는 결과가 되었다.”

- The Wall Street Journal (4/24/92) “기업들이 Superfund 관련비용을 보험회사에 청구하고 보험회사는 이를 거부하여 법정투쟁이 수없이 발생...그 동안의 기업비용 13억불 중 79%가 변호사에게 지급되었고 9%는 내부비용, 단지 12%만이 실제 환경 오염해결에 지출해야...”
- The Philadelphia Inquirer (5/31/92) “오염을 초래한 기업의 비용청구와 이를 회피하려는 보험 회사들과의 법정투쟁이 심각하고 끝없는 대치와 지연으로 흘러..”
- Forbes (7/6/92) “정치가, 극단주의자들 및 이해관계가 얽힌 기업들의 영향으로 미국의 환경 정책이 방향 감각을 상실하여 과도한 비용, 실직, 생활수준의 저하를 하고 있다. 최근의 연구에 의하면 Superfund 법을 촉발시킨 Love Canal에서도 주민에게 아무 실질적 피해가 없어..”
- The New York Times (3/24/93) “과도하고 불합리한 환경규제에 관한 불만이 기업에서 드디어 지방행정 단위로 확산 사소한 문제해결에 막대한 재정지출을 계속 강요당하자 49개 주의 114 시장들이 클린턴 대통령에게 환경정책의 재검토를 요구하며 조직적인 저항운동을 개시..”

이 결과로 1990년대 초반부터는 EPA에서도 조용한 정책전환이 이루어지기 시작하였는데 그 사례로는 노후산업도심지 개발 촉진, 매립지 설계기준의 합리화, 오염원인자와의 협의에 의한 오염지 복원사업 추진 등이 있으며 그 동안 개발된 복원기술의 해외 수출에도 관심을 가지게 되었다.

3. 체계적인 최적대안 선정기법

필자는 1980년대 후반에 여러 Superfund 오염지의 타당성 검토를 수행하면서 위에 설명한 문제점들의 심각성을 경험하였다. 특히 위해도 평가와 타당성 검토과정의 문제점을 인식한 필자는 이의 해결책으로 정비대안의 최적화에 대한 새로운 기법에 착안하여 현업에 적용한 결과 기대이상의 효과를 보았는데(Hwang, 1991) 이 최적화 기법을 아래에 간단히 소개한다.

그림2는 정비대안의 비용과 성능의 일반적인 관계를 보여준다. 이 그림은 성능이 좋은 대안일수록 비용도 높아지며 어느 정도까지의 성능달성이 비용효율 면에서 유리한지도 보여준다. 즉, 대안 D까지는 투입된 비용에 따라 그에 따른 확실한 성능개선이 이루어지나 대안 F를 위한 추가비용의 투입은 의문시됨을 알 수 있다. 이와 같이 비용과 성능을 그림으로 표시하면 대안의 평가와 선정에 객관적인 근거를 제공할 수 있다. 그러나 이 그림은 어느 정도의 성능을 목표로 정해야 하는지를 나타내지는 못하므로 추천대안의 선정에 객관적인 근거를 제공하지는 못하고 있다.

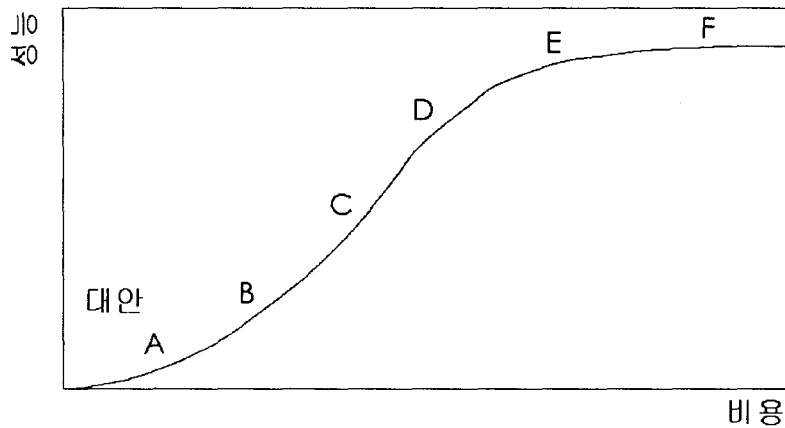


그림 2. 정비대안의 비용과 성능의 관계

정비의 목적은 오염지에 의한 인체위해도를 기준치 이하로 감소시키는 것이다. 따라서 위해도가 목표성능의 기준이 되어야 하므로 각 대안의 성능을 대안 수행 후의 잔류위해도로 변환하면 그림3과 같이 비용-잔류위해도 관계가 나타난다. 그림3의 비용-잔류위해도 곡선은 의사결정을 위하여 다음과 같이 객관적이고 확실한 근거를 제공한다.

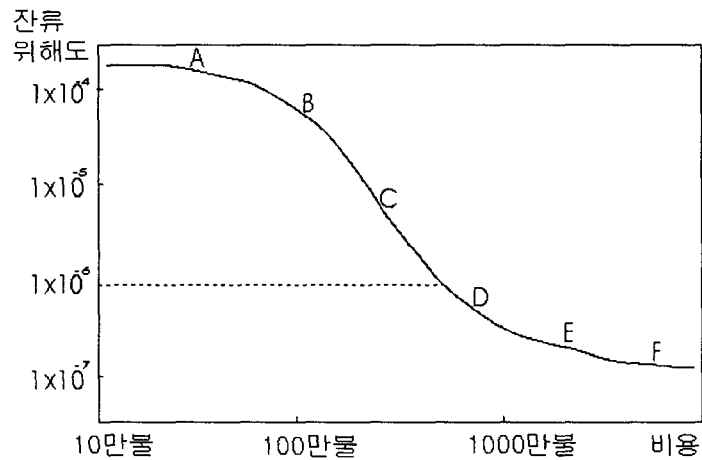


그림 3. 정비대안의 비용과 잔류위해도

- 비용효율 - 위해도 저감을 위하여 비용효율이 높은 대안과 낮은 대안의 범위를 보여준다.
- 최적안 - 위해도 기준을 최소비용으로 만족시키는 최적안을 나타낸다 (그림 3의 대안 D).
- 최적안의 조정 - 위해도 기준을 근소하게 만족시키지 못하는 대안은 설계성능을 개선하여 최소의 추가비용으로 최적안으로 조정할 수 있게 한다.

그림3의 비용-위해도 곡선을 작성하기 위해서는 타당성 검토과정에서 구성한 각 대안에 대하여 잔류위해도를 산정해야 한다. 현장조사 결과를 사용한 초기 위해도 산정은 상당한 전문지식과 인력이 소요되나 타당성검토 단계의 잔류위해도 산정은 그 과정이 다음과 같이 비교적 단순하다.

- 각 대안의 구성요소를 결정한다.
- 각 대안을 실행하면 원 상태와 비교하여 오염물질에의 노출경로가 차단되거나 외부로 유출되는 오염물질의 농도가 감소하므로 결국 인체섭취량이 감소하고 위해도도 감소한다.
- 위해도는 인체섭취량에 (혹은 노출농도) 비례하므로 그에 따라 잔류위해도를 계산한다.

$$R2 = R1 * C2/C1$$

R1, R2 = 대안 수행 전과 후의 특정 오염물질에 의한 위해도

C1, C2 = 대안 수행 전과 후의 특정 오염물질에의 노출 농도

- 잔류위해도는 해당 현장의 모든 오염물질과 모든 노출경로에 대한 R2 값의 합계이다.

위의 식에 사용하는 C1과R1의 값들은 초기의 위해도 평가에서 결정되어 있으므로 타당성 평가에서는 C2 를 구하기만 하면 R2와 잔류위해도를 즉시 구할 수 있다. C2는 각 대안의 내용으로부터 비교적 어렵지 않게 산정이 가능하다. 예를 들면 오염원을 완전히 제거하는 경우에는 C2가 0이 되고, 차단하는 경우에는 차단설계에 따라 비교적 보수적인 누출량을 구하여 C2를 산정하고, 처리하는 경우에는 처리 성능에 따라 C2를 산정할 수 있다.

그림 3에 의하면 각 대안의 평가와 최적안의 선정과정이 정량적이고 객관적이므로 특정 대안의 최종선택 여부에 대한 근거가 명확하여 사실상 논란의 여지가 없어진다. 또한 각 대안의 공정과 비용의 상세사항을 조정하고자 할 때에도 비용-위해도 곡선 상에서 유리한 방향으로 대안의 조정이 가능해진다. 그럼에도 불구하고 그 때까지 이러한 체계적 방법을 사용하지 못하고 시행착오를 되풀이 한 이유는 위해도 평가와 타당성검토를 서로 다른 팀이 수행한 결과로 이러한 기법에 착안하지 못한 탓으로 볼 수 있다.

이 최적화원리를 실제업무에 적용하면 각 대안의 비용과 위해도가 그림3과 같이 완벽한 곡선을 구성하지는 않고 다만 전체적인 추세가 이 곡선과 유사해지며 어떤 대안은 그림4와 같이 전체적 추세와는 동떨어진 위치에 나타나기도 하는데 이는 최선의 대안이거나 최악의 대안이다. 최선의 대안은 현장조건에 맞는 독특하고 창의적인 기술을 적용하여 최소비용으로 위해도 기준을 만족시킬 때에 얻어지고 최악의 대안은 고비용으로 위해도 기준을 만족시키지 못하는 대안으로 오염원 처리를 위해 고비용이 소요되나 사업수행 중의 위해도가 큰 경우에 발생한다. 최선의 대안이 나타나면 이를 적극적으로 발전시켜 채택해야 함은 물론이다. 종전의 타당성 검토에서는 최악의 대안 여부를 판별할 뚜렷한 근거가 없어 실제로는 최악의 대안이 선정된 경우도 허다하였다.

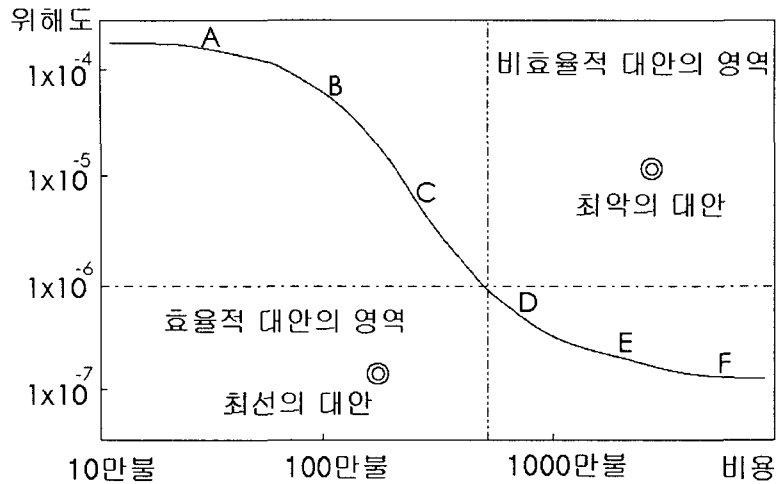


그림 4. 효율적인 대안과 비효율적인 대안

4. 창의적 대안과 최적화의 사례

최선의 대안은 상당수의 현장에서 담당기술자가 창의적인 발상으로 의지를 가지고 시도하면 정도의 차이는 있으나 개발이 가능하다. 이 창의적 대안과 최적화의 사례를 아래에 소개하였다.

4.1 Tyson's Dump 오염토양

여기에 소개하는 Tyson's Dump 오염토양 대책 사례는 따로 상세히 소개된 바 있고 (황, 2002) 아래에는 그 골자만을 요약하였다.

Tyson's Dump는 필라델피아 서북쪽으로 15 mile 떨어진 Schuylkill 강변에 위치한 Superfund 오염지이다. 현장은 폐기된 채석장으로 큰 구덩이가 여러 개 있어 60년대에 Tyson이라는 정화조 청소업자가 인근 화학공장에서 수거한 액상 화학폐기물을 불법투기하여 폐액이 토양과 지하수를 오염시켰다. 토양을 오염시킨 화학성분은 주로 chlorinated benzene, toluene, xylene, 1,2,3-trichloropropane (약칭 TCP) 등이었으며 특히 그 양과 독성에서 TCP가 가장 심각한 오염원이었다. 일차의 대책수립 과정에서 오염토양을 굴착하여 인가된 유해폐기물 매립시설에 재매립하기로 결정했고 추정사업비는 \$15,000,000 이었다.

그러나 1984년 당시 이 비용이 과다하다고 본 오염원인자 측에서 자체 타당성조사를 수행하여 굴착/수송에 따른 2차오염 가능성과 고비용을 이유로 당시 신기술로 시장에 등장한 기화 추출법을 (Soil Vapor Extraction, SVE) 대안으로 제안하였다. SVE의 예상 사업비는 약 \$5,000,000이었고 예상 운영기간은 2년이었다. EPA가 1988년에 이 대안을 승인하고 오염원인자가 실행하였으나 4년간 \$22,000,000의 비용을 투입하고도 목표달성에 실패하였다. 기다리다 못한 EPA에서 1993년에 오염원인자에게 다시 타당성 조사를 수행하여 확실한 대책을 수행할 것을 명령하고 그 당시 사업비 \$50,000,000 정도가 예상되던 굴착 및 현장소각을 강력히 유도하였다. 이 타당성 검토를 수행했던

필자가 수립한 대안의 골자는 다음과 같다.

- 오염토양의 위해도는 주로 유기화합물이 대기로 확산되고 인근주민이 호흡하기 때문이며 이 확산경로는 점토층이나 차수시트로도 차단이 되지 않음을 확인.
- 가장 심각한 오염물질인 TCP는 현장 아래의 암반층 넓은 지역에 퍼졌고 수용성이 낮아 지하수의 오염해결은 반영구적인 양수처리를 필요로 하는 상태.
- 따라서 현장 오염토양을 지하수 대책과 연계하면 유기성 오염물질의 대기확산에 의한 위해도만 제거하면 대상사업의 정비목적을 달성할 수 있음.
- 유기성 오염물질의 확산은 공기 중에서는 빠르나 수중에서는 아주 느리므로 오염토양층을 복토로 차단하되 복토층을 물로 포화시키면 포화복토층을 통한 확산속도가 아주 느리므로 위해도를 기준치 이하로 낮출 수 있음.
- 복토층을 포화상태로 유지하면 복토층의 수분이 아래로 흐르게 되는데 이 하향류의 속도가 포화복토층을 통한 상향확산의 속도보다 수십배 빠르므로 사실상 확산 경로를 확실히 차단함을 입증.
- 포화복토층의 하향류는 지속적으로 오염토양을 통과하며 오염성분을 용출하여 지하수정에서 양수처리 되므로 지하수 대책과도 조화가 이루어짐.

위의 포화복토층 대안은 2백만불 이하가 소요되면서도 위해도를 충분히 낮추는데 반하여 EPA에서 기대했던 소각안은 5천만불의 비용에 위해도는 오히려 높아 (굴착시의 2차오염에 기인) EPA는 포화복토층을 선택하였다. 이 타당성 조사에서 제시한 비용-위해도 곡선은 그림 4와 유사하였으며 특히 흥미있는 사실은 EPA의 기대안은 최악의 대안이었고 포화복토층은 최선의 대안이었다는 점이다.

4.2 Coker's 매립지

Coker's 매립지는 델라웨어 주 중앙지역의 Kent 군에 위치한 산업폐기물 매립지이다. 인근의 화학제품회사에서 발생한 유기성 슬러지를 매립하였으며 매립지는 500m 정도 거리가 떨어진 제1매립지와 제2매립지로 나누어져 있었는데 각 매립지의 특성은 다음과 같다.

제1매립지는 주당국의 허가를 얻어 6-ha의 임대사유지에 1969년에서 77년까지 슬러지를 매립하였다. 매립방법은 트렌치를 굴착하여 슬러지를 매립하고 어느 정도 자연탈수와 건조가 진행된다면 복토를 하고 충분히 시간이 지난 후에는 이미 매립한 지역에도 다시 무작위로 굴착과 매립을 반복하여 총 40,000 m³ 정도를 매립하였다. 매립지는 시내가 흐르는 저습지에 인접해 있고 부지는 저습지보다 3m 정도 높았으므로 매립지역에서 저습지 쪽으로 침출수가 누출되는 흔적이 곳곳에 보였다.

제2매립지는 주정부의 환경법규가 강화되어 단순 매립을 금지하자 500m 정도 떨어진 곳에 휴

경지를 임대하여 1976년부터 1980년 사이에 매립을 계속하였다. 여기서는 길이 40 m, 너비 9 m, 깊이 2 m 정도의 트렌치를 굴착한 후에 얇은 차수시트를 깔고 슬러지를 매립하였는데 모두 50개의 트렌치에 약 40,000m³의 슬러지를 매립하였다. 최소한의 복토를 했으나 슬러지가 침하하고 차수시트가 설치된 탓으로 각 트렌치 상부에는 물이 고여 습지식물이 자라고 있었다.

제1매립지의 현장조사와 위해도 평가결과에 의하면 지하수가 유기성 화합물로 약간 오염되어 있었고 저습지 쪽으로 유출되는 침출수도 인근의 보행자에게 건강상의 위해 요소인 것으로 나타났다. 사실상 주민건강에 대한 위협은 없었으나 비현실적인 위해도 평가의 결과로 정비대책이 필요한 것으로 결론이 나고 그 당시의 분위기에서 어떤 형태로든 처리를 한다면 2,000만불 이상의 비용이 소요될 것이었다. 타당성 검토과정에서 현장자료를 면밀히 검토한 결과 지하수와 침출수가 모두 저습지 쪽으로 유출되며 저습지의 유기성 습지토양에서 분해 흡착되어 오염이 확대되지 않음을 알 수 있었다. 따라서 현장의 자연정화 기능을 그대로 유지하고 침출수 유출지역만 수목을 분쇄한 유기성 필터로 덮고 울타리를 설치하여 주민의 접촉을 막아 위해도를 제거할 수 있었다.

제2매립지는 차수시트의 효과로 침출수 누출이 없어 지하수 오염은 발생하지 않았으나 매립지 내의 폐기물이 침출수로 포화되어 있으므로 언젠가는 차수시트가 파손되고 지하수가 오염되면 지하수를 사용하는 하류지역 주민에 대한 위해도가 문제되는 것으로 나타났고 처리비용은 역시 2,000만불 이상일 것으로 나타났다. 위해도 평가는 50개 트렌치의 차수시트가 일시에 파손되고 침출수 총량이 지하수에 유입되는 것으로 가정하여 지하수 오염정도를 예측하였다. 타당성 검토에서는 비교적 현실적인 가정으로 차수시트가 일부 파손되어 장기간에 걸쳐 일정량의 침출수가 계속 유출되는 것으로 보았다. 이 결과 지하수 오염농도를 예측하고 위해도를 산정한 결과 위해도가 기준치 이하인 것으로 나타났다.

위의 결과를 비용-위해도 곡선으로 나타내어 EPA에 제출하여 간단한 복토, 현장정리, 울타리 설치, 조경 수준의 대안을 수행하도록 승인을 받아 총비용 250만불 수준에서 정비를 마무리하였다.

5. 국내 폐광정비의 최적화 방향

5.1 국내 폐광문제의 특성과 정비방법

국내 폐광의 오염원은 크게 보아 폐광석, 광미, 산성폐수 문제로 대별할 수 있다. 폐광석은 이동성이 낮고 침출수 내의 중금속 농도도 낮아 환경문제의 정도는 심각하지 않다. 그에 비하여 광미는 입자가 매우 작아 우수등에 의한 유실이 쉽고 또한 표면적이 커서 중금속의 용출도 높은 편이므로 환경문제를 유발하기 쉽다. 산성폐수 역시 장기적으로 중금속 용출의 원인이 된다.

폐광의 오염원에 대하여 사용할 수 있는 정비 및 관리방법은 크게 나누어 다음의 세 가지이다.

- 물리적 안정화- 폐광석은 물리적으로 안정한 성질을 가지고 있어 특별한 대책을 필요로 하지 않으나 광미는 물에 젖게 되면 불안정하고 액상화 되기도 하며 특히 흐르는 물에 접촉하면 쉽게 유실된다. 따라서 광미는 제방이나 옹벽 혹은 자연사면을 이용하여 확실하게 저류하여야 하며 흐르는 물에 노출되지 않게 우수관리를 철저히 해야 한다. 또한 광미적치고가 높

은 경우에는 적치사면을 보강하여 사면파괴를 방지하여야 한다. 이와 같은 물리적인 안정화는 큰 비용을 소요하지 않으므로 예방 및 관리수준에서 적용하면 효과적이다. 예방관리가 이루어지지 않아 광미가 대량 유실되면 그로 인한 수질 및 토양오염으로 이어지고 그에 대한 대책도 어려워진다.

- 적극적 차단- 물리적으로 안정된 상태에 있더라도 폐광석이나 광미에서 중금속 농도가 높은 침출수가 발생하여 주위를 오염시키는 경우에는 오염원을 적극적으로 차단하여야 한다. 차단의 가장 보편적인 방법은 표면에 적용하는 차단형 복토와 지하에 설치하는 연직차수벽이다. 이 방법은 오염원 내부로 물의 유입을 차단하고 또한 침출수가 외부로 유출되는 것을 최소화하여 환경오염문제를 제어한다.
- 처리 및 자원회수- 이는 폐광석이나 광미를 적절한 방법으로 처리하여 무해화 혹은 중금속의 용출이 어렵도록 하거나 중금속성분을 추출분리하여 자원으로 사용함과 동시에 오염원에서의 농도를 낮추어 위해도를 줄이는 방법이다.

위의 세 가지 방법 중 물리적 안정화나 적극적 차단은 현재 문제가 되고있는 현장에 즉시 적용하여 단기간에 위해도를 줄이는 이점이 있으나 오염원에 대한 근본적인 해결책이 아니라는 단점도 있다. 이와 반대로 처리나 자원회수는 오염원을 제거하는 근본적인 대책이라는 이점이 있으나 여러 가지 단점도 있다. 우선 현재로는 충분히 경제성이 있고 상용화된 기술이 매우 제한적이다. 따라서 특정현장에 맞는 기술을 개발하여 사용해야 하므로 그에 따른 비용과 시간이 오염문제의 해결과 맞지 않을 수도 있다. 또한 여러가지 중금속이나 오염성분에 대하여 효과적인 기술은 기대하기 어려우며 처리 결과로 상당한 자원회수나 농도 저감이 이루어지더라도 무해화는 달성되지 않아 또다시 차단방법을 적용해야 하는 경우도 많다. 산성폐수는 현장내에서 반응벽이나 습지 혹은 유기성 퇴비 처리 등으로 처리하면 상당한 농도저감을 달성할 수도 있다.

요약하면 무리하게 처리형 정비를 시도하기 보다는 현실에 맞게 피해 확산을 최소화하는데 중점을 두고, 현실적인 기술을 사용하도록 하며, 비용과 효과를 철저하게 분석한 후 당위성이 있을 때에만 처리형 정비를 시도하고, 특히 오염의 예방에 정책자원을 집중하여야 한다. 또한 폐광정비의 목표를 완벽한 문제해결에 둘 것이 아니라 적절한 비용으로 대부분의 위해를 제거하는 것으로 설정해야 하며 이를 체계적으로 달성하기 위한 방법으로 위에 설명한 최적화 기법을 응용할 수 있다.

5.2 최적정비안의 수립

오염지 정비의 최적화기법은 정량적인 위해도 평가에 근거하고 있다. 그러나 현재 국내에서는 오염지에서의 위해도 평가가 실무에 정착되어 있지 않고 위해도 평가의 공인된 지침이 없어 일반적인 적용이 사실상 불가능하다. 따라서 정상적인 위해도 평가를 거치지 않고서도 최적화를 시도할 수 있어야 하는데 이는 위해도 평가의 본질을 이해하면 비교적 간단한 접근방법으로 해결된다. 폐광정비에 적용할 수 있는 최적화 기법은 다음과 같다 (그림5 참조).

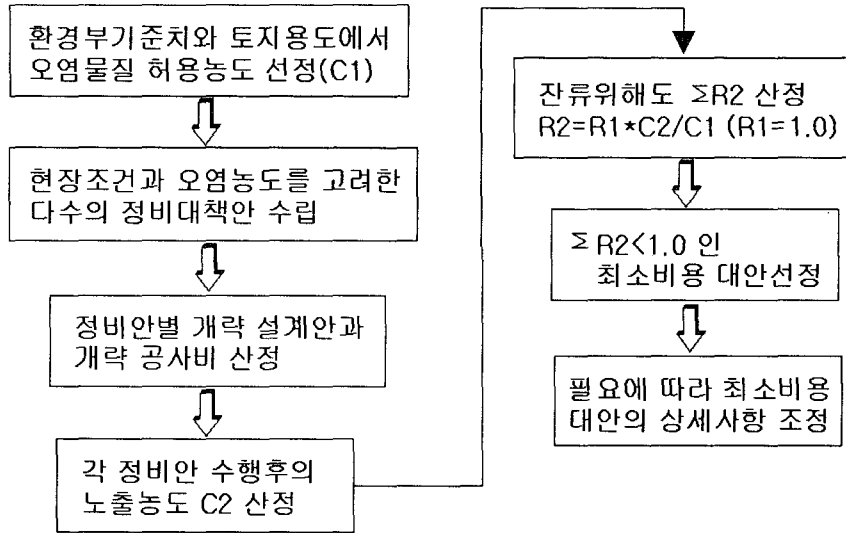


그림 5. 폐광정비의 최적화 절차

- 오염농도 기준- 환경부에서는 이미 토양과 지하수에 대한 각종 오염농도 기준을 정해 두고 있다. 지하수 수질의 경우 용도에 따라 기준을 정하였으며 토양의 경우 토지용도에 따라 (농경지와 공장용지) 우려기준과 대책기준으로 나누었다. 이러한 기준들은 이미 그 도입과정에서 각종 오염물질의 독성과 토지용도에 따른 인체섭취량 개념을 반영하여 인체에 큰 위험이 없는 수준이 되도록 책정된 것이다. 따라서 이 기준을 위해도 평가에 적용할 수 있다.
- 허용농도의 선정- 오염물질이 폐광 인근의 농경지나 목초지를 오염시켰다면 식물물을 통한 위해도가 문제이므로 농경지 우려기준을 허용농도로 (허용 가능한 수준의 위해도를 유발하는 농도) 보고 그 이외의 지역은 인체노출의 기회가 적은 점을 감안하여 공장용지의 대책기준을 허용농도로 선정한다. 이 때의 허용농도는 정상적인 인간활동에서 인체에 미치는 위해도가 우려할 수준이 아님을 의미한다. 폐광에 의한 환경오염이 발생한 지역이라면 대개 현장의 지하수나 토양의 (폐광석, 광미, 인근 토양) 오염물질 농도가 이 허용농도를 초과할 것이므로 적절한 대책을 필요로 할 것이다.
- 정비 대안의 구성- 현장에 적용이 가능한 각종 정비 대안을 (5.1 참조) 구성하여 개략설계를 완성하고 공사비를 산정한다. 이 때 각 정비대안은 명확한 목표와 범위를 설정하여 오염물질이 포함된 토양이나 지하수에 대하여 어느 범위까지 어떤 수준의 정비를 할 것인지를 정해야 한다. 이 때 유의할 점은 목표나 범위를 고정관념에 의하여 설정하지 않아야 하는 점이다. 가령 특정오염물질이 농도는 아주 높으나 적은 양만을 오염시켰다면 이에 대한 대책은 굴착하여 지정폐기물 매립지로 보내는 것이 간단하고 비용도 낮을 것이며, 생산성이 낮은 농경지는 곡물재배에서 정원수 재배로 용도를 바꾸기만 해도 위해도가 없어질 수도 있다.
- 대안 수행 후의 노출농도 산정 대안 수행 후의 노출농도 C2는 대상지역에 오염물질이 존재하고 있다는 사실만으로 현장의 C2를 사용하는 것이 아니고 대안의 효과를 반영하여 실제로 인체에 노출되는 C2를 산정한다. 예를 들어 농경지의 오염토양을 치환한 경우의 평균잔류

농도, 광미적치장의 침출수를 차단하여 누출량을 5%로 줄이면 이에 근거한 지하수 농도, 광미의 용출성을 줄여 침출수의 오염물질 농도가 감소한다면 이를 반영하는 농도가 C2이다.

· 잔류위해도 평가- C2와 허용농도 C1으로부터 다음 식에 의하여 잔류위해를 평가한다.

$$R2 = R1 * C2/C1, \quad \text{잔류위해도} = \sum R2$$

R2 = 대안 수행 후의 특정 오염물질에 의한 위해도, 1.0 보다 작아야 함.

R1 = 1.0 (허용농도에 노출되었을 시에 큰 문제가 없는 수준의 기준위해도)

C2 = 대안 수행 후의 특정 오염물질에의 노출 농도

C1 = 특정 오염물질의 허용농도

위에서 구한 잔류위해도가 1.0 이하인 최소비용 대안이 바로 최적안이 되는데 잔류위해도가 1.0을 근소하게 상회하는 대안은 성능을 약간 개선하면 최적안이 될 수 있다.

<참고자료>

Daekyoo Hwang, Optimizing Remedies in Feasibility Study, Proceedings of the 12th National Conference on Hazardous Materials Control/Superfund '91, Washington, D.C., December 3-5, 1991.

USEPA, Guidance for Conducting Remedial Investigations and Feasibility Studies under CERCLA, Interim Final, USEPA Office of Emergency and Remedial Response, Washington, D.C., OSWER Directive 9355.3-01, 1988

황대규, 환경오염 재해의 책임과 비용 사례 Tyson's Dump, 한국도시방재학회지 제2권 제2호. 2002년 6월