

오염 지하수 양수 및 처리 공정에 대한 전과정평가 Life Cycle Assessment on Pump and Treatment Remediation of Contaminated Groundwater

조종수
Jong Soo Cho

가톨릭대학교 생명환경공학부
Department of Environmental Engineering, The Catholic University of Korea

(2011년 1월 4일 접수, 2011년 6월 26일 채택)

Abstract : Environmental impact by proposed pump and treatment remediation of groundwater contaminated with TCE over 0.6 mg/L down to 0.005 mg/L was assessed for 30 years operation in an industrial park. Total amount of groundwater treated was $2.96 \times 10^7 \text{ m}^3$ and the amount of TCE removed was 17.6 kg at most. The life cycle assessment was used to estimate the environmental cost and environmental benefit and their effects on the environment could be analyzed. Most of the environmental cost was accrued from electricity generation for 30 years pump operation, which includes energy consumption, resources consumption such as coal, crude oil, emission of global warming gas and acid gas into air, waste water production, and waste generation. Environmental impact could be quantified with a Life Cycle Assessment (LCA) model for soil and groundwater remediation and normalized based upon consumption and emission quantities per capita in the world. Among the normalized values, acidification material release was the most significant.

Key Words : Contaminated Groundwater, Remediation, Pump and Treatment, Life Cycle Assessment, Environmental Cost and Benefit

요약 : 국내 TCE에 의해 오염된 산업 공단내의 지하수 정화 방법으로 양수 및 처리(pump and treatment) 공법이 제안되었다. TCE 농도 0.6 mg/L 오염 지하수를 30년 동안 이 공법에 의해 처리하여 0.005 mg/L 이하 농도로 방류할 경우 그 과정에서 발생하는 환경 비용과 환경 편익을 전과정평가에 의해 산출하였으며 그에 따른 환경 영향 및 환경 효과를 분석하였다. 방류 지하수의 총량은 $2.96 \times 10^7 \text{ m}^3$ 이며 제거된 TCE의 총량은 최대 17.6 kg이었다. 환경 비용은 에너지의 소비, 자원의 소비, 대기, 수질 및 고형 폐기물 형태의 오염 물질의 배출량 등으로 산출되었으며 환경 편익은 정화된 지하수의 사용으로 얻어졌다. 환경 비용에 따른 환경 영향은 30년 동안 구동하는 pump에 의한 전력 사용, 발전을 위해 소모되는 석유, 석탄 등의 원자재의 소모, 방출되는 지구 온난화 및 산성 가스, 부영양화, 폐기물의 발생을 포함하며 토양/지하수 정화 공정 전과정평가 모델의 사용으로 정량화하고 전세계 일인당 소모 또는 배출하는 표준량으로 나누어 표준화하여 비교한 결과 산성비 원인 오염물 배출이 가장 심각하였다.

주제어 : 오염지하수, 정화, 양수 및 처리, 전과정평가, 환경 비용 및 편익

1. 서론

인간의 모든 활동은 주변 환경에 여러 가지 영향을 미친다. 이러한 활동은 원자재와 에너지의 소비를 증진시키고 소비에 의한 부산물은 주변 환경으로 배출되어 원자재의 고갈과 환경의 악화로 이어진다. 오염된 환경의 정화 활동도 예외가 아니다. 환경 정화 작업의 목적은 오염을 줄이고 환경 편익, 즉 정화된 토지, 건축물, 기간 시설과 깨끗한 지하수 및 지표수 등을 얻는 것이나 정화 활동 과정에서 들어가는 원자재의 소비, 대기 오염 물질, 폐수, 고체 폐기물의 방출과 같은 환경 비용과 부정적인 환경 영향을 유발하는 경우가 많다.¹⁾ 이런 환경 비용과 편익의 수치 계산은 공간적, 시간적 규모의 상이성 때문에 간단하지 않으며 많은 사람들이 이런 환경 비용을 무시하거나 과소평가한다. 오염된 토양이나 지하수의 정화 에서 최선의 정화 방법의 선택은 기술적으로 효과적일 뿐만 아니라 금전적, 환경적

비용 면에서 경제적이어야 한다. 전통적으로는 경제성과 기술 적용성 등이 주요 결정 인자이었으나 최근에는 여기에 더해 전체적으로 환경에 미치는 영향을 고려한 선택 방법이 도입되고 있는 추세이다. 정화 과정 전반에 걸쳐 환경 비용을 최소화하고 환경 편익을 최대화하는 것이 최근에 대두되기 시작한 녹색 정화(green remediation)²⁻⁴⁾ 또는 지속 가능한 환경 정화(sustainable remediation)⁵⁾의 개념이다. 정화의 초기 단계인 구상과 설계 과정에서 에너지, 원자재, 물 등 자원의 사용을 줄이고 생태계의 회복과 부지의 재사용을 고려한 정화 방법을 선택한다. 또한 정화 과정 중에 발생하는 에너지 및 원자재의 소비를 최소화하고 오염 물질 방출의 방지 또는 최소화를 추구한다. 중기계 사용에서 발생하는 대기 오염과 환경 교란, 생태계에 미치는 영향을 최소화한다. 그와 동시에 토양의 유실, 부지 밖 수질에 미치는 악영향을 최소화하며 건설과 해체시의 폐기물의 생성을 줄이고 현장 기기 사용시 재생 가능한 탄소 중립적인

† Corresponding author E-mail: jongscho@catholic.ac.kr Tel: 02-2164-4373 Fax: 02-2164-4765

에너지의 사용을 고려한다. 전체적으로 에너지의 소비를 줄이면서 효율을 증대하는 공정이나 장비의 선택을 고려한다.

정화 현장 상황에서 발생하는 환경 비용과 편익을 산출하고 환경 영향과 그 효과를 분석하는 방법으로 전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA) 기법이 있다. 전과정평가 기법은 전통적으로 정화 전략 및 공법의 선택 시 고려했던 기술적인 타당성, 경제성, 시간적, 공간적 적합성 외에 환경 비용과 환경 편익에 대한 분석을 더해 주어 환경적인 균형을 제공해 줄 수 있다.⁶⁾ 전과정평가는 말 그대로 전체 공정에서 나타나는 환경 영향 전반에 대해 평가하는 과학적인 기법이다. 환경 정화 작업에 적용된 전과정평가의 결과는 토양 및 지하수 내의 오염 정화 작업의 설계에서 최종 해체 공정까지 전체 공정에 걸쳐 발생하는 환경 비용과 편익, 그의 영향과 효과에 대해 정량적인 자료를 제공한다. 환경 비용은 자원의 소비와 환경 배출로 구성된다. 자원의 소비는 에너지, 원자재, 토양, 물, 토지의 소비를 포함한다. 환경 배출은 토양 및 지하수의 정화 후 남는 잔존 오염물질과 소음 및 진동, 대기 오염, 폐수, 토양을 포함한 고형폐기물 등과 같은 오염물질을 주변 환경으로 배출하게 모든 것을 포함한다. 자원의 소비와 환경 오염물의 배출이 미치는 영향과 효과는 부존 자원의 희소성 증가, 물리적인 환경 변화, 대기 오염에 의한 독성 증가, 광화학적 오존 생성, 산성비, 오존층 파괴, 지구 온난화, 수자원의 희소성 증가, 인체 및 생태계 독성, 부영양화, 산성화, 토양의 독성, 토양 산성화, 폐기물 증가 등이다. 환경 정화를 통해 얻는 환경 편익은 토양과 지하수 내의 오염 물질의 감소이며 수반하는 환경 영향과 효과는 인체 및 생태계의 위해도 감소 등을 포함한다. 환경 편익은 오염 정화 작업의 중착점을 결정하는데 매우 중요한 역할을 하게 된다. 정화 공정은 국지적으로 행해지는 작업이고 그로 인해 얻어지는 환경 편익은 국지적인 경우가 많으나 환경 비용에 따른 영향과 효과는 광역적 또는 전지구적인 경우가 많다. 국지적 영향과 효과는 주민의 인체 및 주변 생태계의 독성 증가 또는 감소, 폐기물 발생, 수자원의 파괴, 지역 조경의 변화와 작업 중에 발생하는 사고에 의한 부상 또는 불쾌한 환경에서 발생하는 고통 등이며 광역적 효과는 광화학적 오존의 형성, 산성화, 부영양화 등이 발생하고 전지구적으로 지구 온난화, 오존층 파괴와 화석 연료, 금속 및 mineral 등의 원자재 소비에 따른 자원의 고갈이 나타난다.

토양 정화 시 토지 이용 가치의 증가는 경제적 편익의 증가로 이어질 수 있다. 오염 토양이나 지하수의 정화를 위해 투입되는 경제적 비용이 경제적 편익 보다 많은 경우에는 생태적 위해도 감소에서 얻어지는 편익에 대한 평가가 적절하지 못한데 기인한다. 전과정평가에서 산출되는 환경 비용과 환경 편익의 경우 이를 금전적 가치와 같은 객관적 평가 가치로 환산하기 힘들기 때문에 객관적인 비교가 힘든 경우가 많다. 전과정평가에서 많은 경우 정량적인 분석을 하고 있으나 정량적 분석의 비용과 자료의 정밀도의 문제가 있을 시 정성적 분석만 할 경우도 있다.^{1,10)} 토양/지하수

정화 과정 전반에 대한 전과정평가 기법은 네덜란드, 독일, 미국, 캐나다, 덴마크 등에서 개발되었다.⁷⁻⁹⁾ 토양 및 지하수 정화에서의 전과정평가 적용은 정화 공법의 선택 과정^{1,10-12)} 또는 정화 후^{1,6)} 적용하는데 초점을 맞추고 있다. 본 연구에서는 기술적, 경제적 타당성 조사에 의해 이미 결정된 오염 지하수 정화 공법에 대해 환경 비용 및 편익 분석을 실시하고, 환경 비용 발생이 제일 많은 부분을 제시하고 대안을 찾고자 하였다.

2. 연구 방법

2.1. 공간 규모

오염 현장에 제한되게 정화 공법을 적용함으로써 전과정평가에서 요구하는 공간 규모는 정화 현장에 국한하였다. 그러나 정화 공정이 현장에만 국한될 경우라도 공정을 수행하는 과정에서 발생하는 환경 비용 및 편익에 의한 환경 영향과 효과는 국지적, 광역적, 전지구적으로 다양한 범위에서 나타난다.

2.2. 시간 규모

토양 및 지하수 오염 정화에서 시간 규모가 환경에 미치는 영향은 매우 크다. 예를 들어 매립지로 보내진 토양은 여러 세기에 걸쳐 영향을 미칠 수 있으나 열처리에 의한 정화는 단기간에 심한 영향을 미친다. 보통 25~30년을 정화 공정의 전과정평가의 시간적 규모로 적용하나^{10,13)} 50년을 적용하는 경우도 있다.¹⁴⁾ 정화 종료 후의 장기적 관찰을 포함할 경우 시간 규모는 더 길어 질 수 있다. 이번 분석에는 오염 지하수의 정화 방법으로 양수 및 처리 공법을 적용할 경우에 한해 30년 동안의 정화 작업을 가정하고 전과정평가를 적용하였다.

2.3. 주 공정 및 2차 공정에 의한 환경 비용 및 편익

토양 및 지하수 정화의 주공정은 환경에 긍정적인 영향을 미치나 2차 공정은 부정적인 영향을 미칠 때가 많다. 여기서 2차 공정이란 정화에 사용되는 pipe, 기계, 전력, 자재 등을 생산하는 과정으로, 2차 공정을 고려할 때 환경에 미치는 부정적인 영향이 크게 확대된다. 예를 들어, 투수성 반응 벽체나 미생물 제재를 이용하여 오염 지하수의 정화를 수행할 경우 주공정, 즉 현장에서의 지하수의 정화 공정은 초기 설치 공정을 제외하고 주변 환경에 미치는 부정적 영향이 미미하다. 그러나 공정에 사용되는 철분, 미생물 제재, 활성 탄소, nitrate, 과산화수소 등을 생산하는 2차 공정을 고려할 경우 토양 지하수 정화 공정의 주공정보다 훨씬 심각한 영향을 미치는 경우를 볼 수 있다.^{1,6)} 이번 분석에서는 관측 계기나 소모성 용품, 현장 설치용 콘테이너 간이 시설 제작 등 2차 공정을 전부 포함하였으나 굴삭기나 천공기 등의 중장비의 생산에 의한 환경 영향은 고려하지 않았다. 가능한 방법중의 하나는 중장비의 예상 사용 시간에

서 실제 현장에 투입해 사용한 시간 부분을 포함할 수 있으나 실제로 현장 사용 시간이 수명에 비해 매우 짧은 경우가 많아 본 연구에서는 이 부분은 포함하지 않았다.

2.4. 전과정평가 모델의 선정

본 연구에 사용된 전과정평가 모델은 유럽연합 LIFE Project의 일환으로 EU, 덴마크 국립 철도, 덴마크 주립 철도 관리국, 덴마크 환경청이 주관하고 ScanRail Consult¹⁾가 개발한 토양 및 지하수 정화를 위한 전과정평가 모델을 이용하였으며, 계산에 필요한 life cycle inventory (LCI) 자료는 가능한 국내 자료²⁰⁾를 사용하였다. 국내 자료가 없을 경우 국제적으로 통용되는 자료 또는 EU 자료^{1,21)}를 이용하였다.

3. 국내 오염 지하수 정화 공정에 대한 전과정평가의 적용

국내의 한 산업 단지 내에서 염소유기용제 trichloroethylene (TCE)에 의해 오염된 지하수에 대해 제안된 적극적 정화 공법인 양수 및 처리(pump and treatment) 공법에 전과정평가를 도입하여 정화 공정 전반에 포함된 환경 비용과 환경 편익을 산출하고 환경 영향과 효과에 대해 분석하였다. 이 현장에서 양수 및 처리 공정을 추천한 이유는 오염 범위가 넓고 이미 지표수로의 오염물의 유출이 확정적으로 드러나고 있어 우선적으로 오염물의 지표수로의 유입을 차단하는 한 방향으로 양수 및 처리 공법을 추천하였다. 다른 이유는 오염원으로 지적된 1차 오염원인 외에 2차 오염원과 군소의 오염원들이 발견되어 책임 소재를 놓고 장기간의 공방이 예상되는 현 시점에서 일단 오염 지하수의 지표수 유입을 차단하는데 주목적을 두고 있었다(Fig. 1). Funnel and gate, permeable reactive barrier 등의 수동적 차단 공법도 고려하였으나 지하수층 하단의 암반 차단면까지 깊이가 깊어(15~20 m) (Fig. 2) 차단벽을 설치하기 위해 일반적인 굴삭기를 사용할 수 없고 대규모 천공기 등을 이용해 차단벽 또는 반응벽체 등을 설치하는 경우 경제적으로 타당성이 없다고 판단하였다. 그 외 생물적 정화 또는 화학적 환원 공법을 사용하기 위해서는 현장에서 또는 현장 시료를 이용한 실험실에서의 추가적인 타당성 실험(feasibility test)이 요구되고 있는 실정이었다.

3.1. 양수정 및 처리 시설의 설계

현장 정밀 조사에 의해 얻어진 오염 지하수의 현황 자료에서 산출된 용해된 TCE 총량과 오염지하수의 부피는 아래의 Table 1과 같다.

Table 1. TCE contaminated area, volume of contaminated groundwater and total amount of TCE in groundwater

Concentration	Plume area	Aquifer thickness	Volume of contaminated groundwater	Total TCE
Detected TCE > 0.03 mg/L	274,000 m ²	12 m	986,400 m ³	86.40~207.36 kg

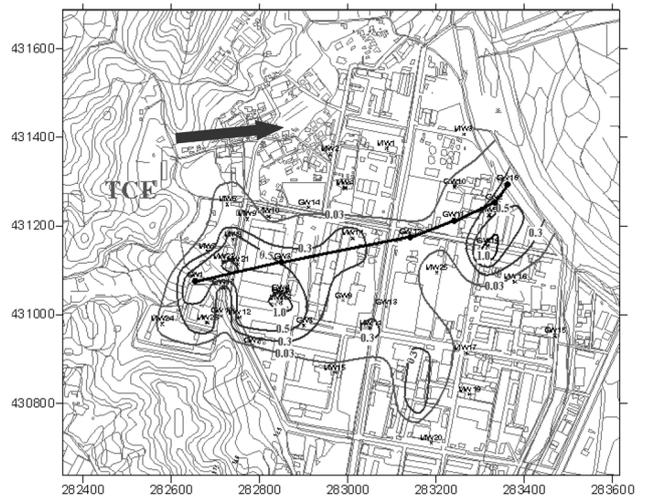


Fig. 1. TCE concentration distribution in the groundwater. Numbers in the map mean TCE concentrations in groundwater. Surface water (river) locates at the end of plume contour plot, next to GW16. Groundwater flows from left to right (→).

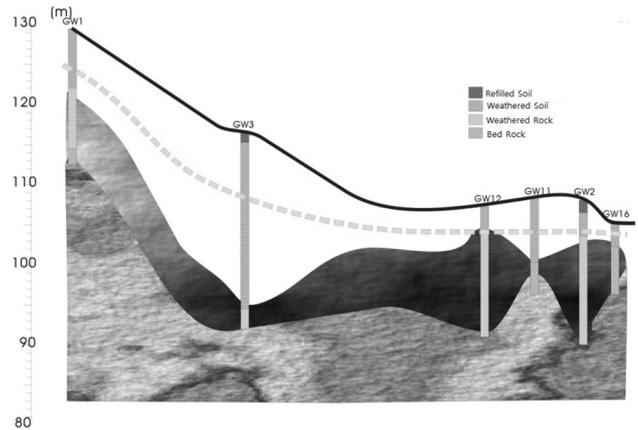


Fig. 2. Cross-sectional geological diagram of the site from GW1 to GW16. Dotted line shows the water table.

3.1.1. 양수정의 설계

공단의 경계에 해당하는 지하수 흐름의 하단에 위치한 하천으로의 오염 지하수의 유입을 방지하기 위해 지하수 흐름을 가로지르는 방향으로 오염 지하수 차단용 양수정을 설치하는 것을 가정하였다.

양수 처리해야 할 지하수의 이론적 총량은 US EPA의 Batch Flush 모델^{15,16)}에 의해 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\text{Number of Pore Volume} = -R \ln (C_t/C_o) \quad (1)$$

여기서 R = 지연 상수(retardation factor, 1.82), C_t = 정화 목표 농도(0.005 mg/L), C_o = 유입 농도(0.6 mg/L)이다. 이 값

들을 위 계산식에 대입하여 요구되는 pore volume의 수는 대략 9가 얻어진다. 계산식 (1)은 지하수에 계속적인 오염원, 즉 DNAPL이나 잔류 TCE 오염원이 불포화층 토양이나 대수층 내에 존재하지 않으며 지하수 내 용존 TCE가 지하수와 토양 간 흡·탈착이 순간적인 선형 모델을 따른다는 가정하에 성립된다. 간단한 시스템에 적용가능하나 과소 평가하는 경우가 많다. 위의 가정이 정확할 경우 연간 1 pore volume을 양수 처리 할 경우 9년 안에 전체 농도를 정화 목표치(5 µg/L) 이하로 낮출 수 있다. DNAPL 이나 토양 내 잔류 오염원이 존재할 경우 오염원의 제거가 우선되어야 한다. 그렇지 않으면 장기간(50~100년)의 양수 처리가 요구된다. 일 년간 양수하는 지하수의 pore volume을 결정하는 것은 매우 중요한 가치 중의 하나이다. 대부분의 pump and treatment 경우 0.3~2 pore volume/year를 양수한다. 대부분의 경우 연간 2 pore volume 보다 적은 양을 양수 처리하는 것으로 나타나고 있다(총 24개 경우 중 22개 경우)^{17,18)} 본 현장의 경우 일년에 1 pore volume 의 지하수를 양수 처리하고 30년 동안 운행한다고 가정하였다. 이 경우 연간 지하수 처리량은 $9.864 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{year}$ 이 된다.

본 연구에서는 지하수의 정화보다는 오염 지하수의 확산을 막는 차단에 중점을 두어 일일 양수 용량 $338 \text{ m}^3/\text{day}$ 의 양수정을 지하수 흐름 방향에 직각 방향으로 일렬 8개 설치 하여 오염 확산을 차단하는 것을 설계하였다. 최대 포획 구간의 계산을 Grubb¹⁹⁾의 계산식에 의해 산출하였다.

$$y_{\max} = QL/K(h_1^2 - h_2^2) \quad (2)$$

여기서, y_{\max} 는 양수정에 의한 최대 지하수 포획 구간(m), Q는 양수정 당 일일 양수량($338 \text{ m}^3/\text{day}$ per well), L은 지하수 수위 관측 거리(m), K는 투수 계수($1.86 \text{ m}/\text{day}$), h_1 는 지하수 상류 방향의 수위(m), h_2 지하수 하류 방향의 수위(m)이다.

위의 수식을 다시 쓰면 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$y_{\max} = Q/[K(h_1 + h_2)(h_1 - h_2)/L] \quad (3)$$

여기서 $h_1 + h_2 = 24 \text{ m}$ (평균 수위의 합), $(h_1 - h_2)/L = 0.0445$

m/m (평균 수위 구배)에서 $y_{\max} = 170 \text{ m}$ 이다. 단일 양수정이 지하수 흐름 방향에 대해 직각 방향으로 170 m의 최대 포획 구간을 가진다. 그러므로 양수정의 간격은 지하수 흐름 방향의 수직 방향으로 150 m의 간격을 두고 설치 할 경우 오염 지하수의 흐름을 차단, 포획하여 오염물의 확산을 차단할 수 있다. 각각의 양수정마다 관정내 양수 펌프(1.5 kw in-well pump)를 설치한다. 지하수 대수층의 투수 계수가 큰 관계로 평균 수위 12 m를 유지하며 예상되는 침강 수위는 0.4~1.0 m로 양수정 내의 지하수위의 침강은 심각하지 않으며 홍수기나 갈수기에도 큰 문제가 없으리라 판단되었다.

8개의 양수정에 1.5 kw의 양수 펌프를 하루 24시간, 30년 동안 가동시의 전체 전력 소비량은 $1.14 \times 10^7 \text{ MJ}$ 에 이르게 된다.

3.1.2. 활성탄소 충전탑 설계

양수정에서 양수된 오염 지하수는 처리 시설로 이송되고 활성탄으로 구성된 처리 시설에서 처리된 후 지표수로 방류된다. 활성탄 처리 시설의 하루 오염 지하수 처리 용량은 $2,700 \text{ m}^3$ 이다. 활성탄 충전탑의 규격은 오염 지하수 내 TCE 총량(207.36 kg)을 30년 동안에 처리한다고 가정하고 산출된 활성탄 요구량은 31.2 ton에 이르며 연간 1.04 ton이 사용되며 이런 규모의 활성탄 충전탑 1개의 부피는 약 3.3 m^3 이 된다.

활성탄 충전탑은 3기를 직렬로 연결하고 첫번째 충전탑에서 나온 처리수의 TCE농도가 정화 목표 농도 $5 \text{ µg}/\text{L}$ 이상 검출되면 활성탄이 소진된 것으로 판단하고 2번째 충전탑을 첫 번째로 이동하고 3번째 충전탑은 2번째로 새로운 충전탑을 3번째에 연결 설치 후 소진된 충전탑은 처리업자에 보내 재생하도록 한다.

3.2. 환경 비용 및 편익 분석

다음 사항 등을 포함하여 환경 비용 및 편익 분석의 boundary를 설정하였다. 아래 Fig. 3에 경계, 환경 비용 및 환경 편익에 관한 개념도를 제시하였다. 각 단계별 발생하는 환경 비용은 Table 2에 나열하였다.

Table 2. Environmental cost expected at each stage of pump and treatment process

Processes	Environmental cost	Secondary process environmental cost
Pumping well Installation	Electricity, drilling ring fuel, bentonite, sand, cement, PVC pipe, steel pipe	Environmental cost for electricity generation, PVC pipes, bentonite, and cement
Manifold connection	Electricity, drilling rig fuel, PVC pipe, measuring gauges	Environmental cost for electricity and PVC pipes
Pump installation	Electricity, fuel, connector PVC, steel pipe, gauge, oil	Environmental cost for electricity and PVC pipes
Connection to treatment system	Fuel, cement, steel, PVC pipes, gauge	Environmental cost for electricity and PVC pipes gauge, granular activated carbon (GAC) towers and GAC production
Operation of pumping and treatment system	Electricity, fuel CO ₂ , used GAC and tower, landfill, waste water	Environmental cost for electricity and PVC pipes gauge, granular activated carbon (GAC) towers and GAC regeneration or disposal
Discharge of treated groundwater	Residual contaminants	
Recharge of treated groundwater	Residual contaminants	
Sampling and analyses	electricity, glass, plastics, waste water	

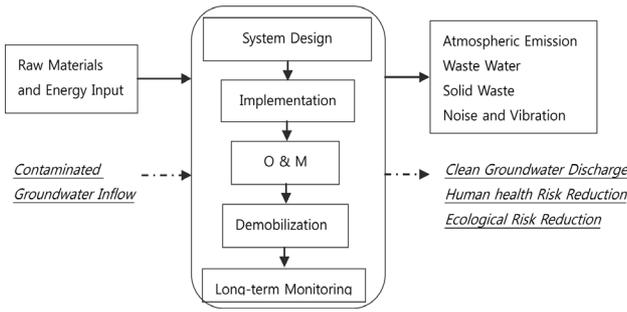


Fig. 3. System boundary and anticipated environmental cost and benefit for pump and treatment remediation of TCE contaminated groundwater.

현장에 출·퇴근하는 직원 및 설치업자, 기자재 배달을 위한 차량의 연료 사용과 거기에 따른 CO₂와 VOC의 대기 방출이 환경 비용에 포함되었다. 중기계의 현장 이동에 소요되는 환경 비용 역시 포함되었다.

환경 편익은 지하수내의 오염 감소로 인한 인체 건강 위해성, 생태계 위해성의 감소를 포함할 수 있으나 본 분석에서는 수자원의 확보만 포함하였다.

4. 결과

국내 TCE에 의해 오염된 지하수 오염 현장에 설계된 양수 및 처리 공법에 의한 지하수 정화 작업에 대해 전과정 평가 적용 결과를 다음 사항 별로 정리하였다.

4.1. 자원 및 에너지의 소비

예상한 대로 30년 동안의 양수 펌프를 작동하면서 소비되는 전기 에너지량이 가장 많았다. 전체 에너지의 소비량은 4.15×10⁷ MJ인데 이 가운데 양수 펌프를 작동하고 동파 방지를 위한 파이프의 전열 난방, 밤에 작업실의 전등용으로 사용된 전기 에너지가 3.09×10⁷ MJ로 전체 에너지 소비량의 75.4%를 차지하였다(Table 3). 이런 많은 전기에너지의 사용은 발전을 위해 많은 양의 석탄, 석유, 천연가스 등의 부존 자원을 소모하게 된다. 발전 외 소비된 주원자재는 PVC pipe의 생산에 사용되는 석유, 교통, 운송용 트럭, 중기계에 사용된 유류 등이다. 그 외 양수 펌프나 임시 사무용 컨테이너, 저장용 컨테이너 제조에 사용된 철강 제재

Table 3. Amount of energy and raw material consumption

Energy	4.15×10 ⁷ MJ
Petroleum product	21 ton
Coal	99.5 ton
Steel	2.8 ton
Coconut	984 kg

(2.8 ton) 등이 추가로 사용된 원자재이다. 철강 원자재는 회수하여 재사용하거나 재활용하는 품목으로 계산하였다. 국가 LCI 정보망 database의 자료에 의하면 활성탄 1 ton 제조 시 코코넛 984 kg, 재활용 활성탄 579 kg이 소요된다. 그러므로 현장 사용에 필요한 활성탄 31 ton의 제조를 위해 코코넛 30.5 ton, 재활용 활성탄 18 ton이 필요하다. 이 사업에서 사용된 활성탄은 전량 재활용이 가능하다.

기타 토양, 토지 등의 사용은 경미한 관계로 고려하지 않았다.

4.2. 환경 배출

주공정인 지하수 양수 및 처리 공정과 2차 공정에서의 환경 오염물 배출에는 대기, 폐수, 고체 폐기물 등이 포함되어 있다(Table 4).

4.2.1. 대기 오염물의 배출

현장에서 운영하는 중장비 및 운송 수단용 연료의 연소와 같은 주 공정과 발전용 연료 연소 등 2차 공정에서 지구 온난화 가스(주로 CO₂), 산성비의 원인인 SO₂, NO_x 등을 배출하며 지구온난화, 산성비등의 환경 효과를 유발한다. 국내의 경우 전기 1 kwh 당 CO₂의 발생량(487.2 g/kwh, 국가 LCI 정보망 1990 자료, 2009)²⁰⁾이 유럽 국가 평균(548 g/kwh, EDIP Product database)^{1,21)}에 비해 적은 편으로 원자력에 의한 전력 생산(43%)이 비교적 많은 부분을 차지하는데 기인한 것으로 사료된다. 대기 방출 오염물질로는 CO₂가 가장 많은 부분을 차지하고 그 외에 SO₂, NO_x, HCl, VOC, 분진(particulate material)등이 대기 중으로 방출되었으며 분진 중에는 수은 등의 중금속이 포함되어 있다.

4.2.2. 수질 오염물의 방출

발전 및 소모품, 계기등의 생산 등 2차 공정에서 폐수가 발생하며 폐수에 BOD, COD, SO₄, nitrogen, 부유 고형물,

Table 4. Total amount of contaminant release into environment

Air pollution		Water pollution		Solid waste	
CO ₂	2.32×10 ⁶ kg	Waste water	2.48×10 ⁵ ton	Bulk waste	3.19×10 ⁵ kg
SO ₂	1.78×10 ⁴ kg	BOD	2.87 kg	Ash and slag	8.72×10 ⁴ kg
NO _x	9.91×10 ³ kg	COD	19.5 kg	Nuclear waste	1.35×10 ² kg
VOC	24 kg	SO ₄	4.55×10 ³ kg	Hazardous waste	4.05×10 ³ kg
PM	1.09×10 ³ kg	Nitrogen	4.9 kg		
		SS	32.7 kg		
		Heavy metals	532 kg		

Table 5. Characterization factors for environmental effect

Category	Unit of indicator	Unit characterization factor	Characterization factor Ci for inventory data
Energy Consumption (EC)	Tonnes of oil equivalent, (TOE) ^a	TOE/ton	Brown coal 0,0409, hard coal 0,1836, natural gas 0,5212
Global warming potential (GWP)	CO ₂ eq.	kg CO ₂ /kg	CH ₄ 23, N ₂ O 296, CF ₄ 5700
Acidification potential (AP)	SO ₂ eq.	kg SO ₂ /kg	NO _x 0,70, HCl 0,88, HF 1,60, H ₂ S 1,88, NH ₃ 1,88
Terrestrial eutrophication potential (TEP)	PO ₄ ⁻³ eq	kg PO ₄ ⁻³ /kg	NH ₃ 0,35, NO _x as NO ₂ 0,13
Aqueous eutrophication potential (AEP)	PO ₄ ⁻³ eq	kg PO ₄ ⁻³ /kg	NH ₄ ⁺ 0,327, NO ₃ ⁻ 0,095, N-comp 0,42, P-comp 3,06, COD 0,022
Photochemical ozone formation potential (POCP)	C ₂ H ₄ eq.	kg C ₂ H ₄ /kg	C ₂ H ₆ 0,189, formaldehyde 0,421, CH ₄ 0,007, NMVOC 0,416, VOC 0,377

^a TOE = 42 GJ = 4.2 × 10⁴ MJ

중금속들이 포함되어 함께 방출된다. 폐수 처리 공정은 본 분석에서 제외하였다.

4.2.3. 고체 폐기물

고체 폐기물로는 석탄 발전소에서 발생하는 연소재와 철재 제품 생산 과정에서의 슬래크, 원자력 발전소에서 나오는 방사능 오염 폐기물, 그리고 정화 공정에서 발생하는 폐자재, 유해폐기물, 화학적 폐기물 등이 고체 폐기물로 방출되었다.

방출되는 오염 물질은 발전소에서 전력 생산에 따른 오염 물질의 방출이 가장 많은 부분(전체 CO₂의 80%, SO₂의 70% 발생)을 차지하고 있다.

4.3. 환경 효과

지구 온난화(CO₂ equivalent), 산성비(SO₂ equivalent), 광화학적 오존 생성(C₂H₄ equivalent) 그리고 부영양화(NO₃ equivalent)의 4가지 효과를 산출하였다. 지구온난화 효과는 배출되는 CO₂, CH₄, N₂O 등은 CO₂, 산성비의 원인이 되는 SO₂, HCl 등은 SO₂, 광화학적 오존 생성, 부영양화 오염물의 총량은 각각 C₂H₄, NO₃ 값으로 환산하였다(Table 5). 환경 효과의 표준화(normalization)는 원자재의 경우 전세계 생산량을 인구로 나눈 값을 기준으로 하고(Table 6), 오염에 의한 환경 효과는 전세계 인구당 배출하는 오염량에 의한 환경 효과를 기준으로 하여 산출하였다(Table 7). 에너지 소비의 경우 2000년도 기준으로 지구상 전체 인류에 의해 소비되는 일인 일년 소비치의 404배였으며 지구 온난화 가스는 1인이 190년 동안 배출하는 양에 해당 되었다. 특히 산성화 가스의 총량은 1인이 4,350년 동안 배출하는 양에 해당하는 것이었다.

Table 6. Normalization factors (average value for world population in year 2000)

Energy	2,447 TOE/year/capita
GHG	13,167 kg CO ₂ /year/capita
Acid gas	5,7 kg SO ₂ /year/capita
Photochemical ozone formation gas	56 kg C ₂ H ₄ /year/capita
Nutrient salts release for eutrophication	7,8 kg PO ₄ ⁻³ /year/capita

Table 7. Environmental effect estimation

Environmental Effects	Unit	Total amount	Total amount/normalization factor (year · capita)
Energy consumption	TOE	9,88 × 10 ²	404
GHG emission	kg CO ₂ eq.	2,51 × 10 ⁶	190
Acid gas emission	kg SO ₂ eq	2,48 × 10 ⁴	4350
Photochemical ozone formation gas emission	kg C ₂ H ₄ eq	2,10 × 10 ²	3,75
Nutrient salt release for eutrophication	kg PO ₄ ⁻³	1,30 × 10 ³	167

4.4. 환경 편익

지하수 정화의 목적이 용해된 TCE 성분을 추출하여 음용수 기준(5 µg/L)을 만족하는 지하수를 방류하는데 있으므로 본 공정을 통해 얻어 지는 환경 편익으로 하루 2,700 m³, 30년 전기간 2.96 × 10⁷ m³의 정화된 지하수를 얻을 수 있다. 양수 및 처리 공법에 의해 제거된 TCE의 최대량은 17.6 kg으로 현장에서 추산된 TCE 총량의 8.5~20.7%에 해당되는 양이다. 현장에서는 오염된 천층지하수가 음용수나 생활 용수로 사용하지 않고 있으며 우물을 사용하던 거주 가정에는 오염 원인이 상수도 시설을 제공하여 생활 용수로 사용 중이다. 공단 내 여러 공장에서는 심층 지하수를 양수하여 사용 중이므로 현재 상태에서 지하수 오염에 의한 인체에 미치는 건강 위해도 심하지 않다고 판단하였다. 생태계 위해도 감소에 따른 환경 편익은 산출할 근거가 매우 부족하였다. 이런 이유에서 오염 지하수 정화에 따른 인체 및 생태계 위해도 감소는 별도로 산출하지 않았으며, 정화된 지하수의 생산과 지표수로의 유출로 환경 편익을 집산하였다. 앞으로 예상할 수 있는 천층지하수의 유입에 의한 심층지하수의 오염과 거기에 따른 공업 용수로서의 가치, 지표수로의 유출에 따른 생태계에 미치는 위해도 평가 등은 추가로 연구해야 할 사항이다.

5. 전과정평가 적용의 한계점

현재 국가 LCI database에 국내 LCI 자료가 축적되고 있

지만 많은 자료가 부족하며 필요할 경우 외국 자료, 특히 EU나 software에 포함된 덴마크 자료를 사용하였는데 이 또한 2000년도 자료가 대부분이었다. 이런 자료의 부족 및 부정확성 문제는 단지 전과정평가 분석에만 국한된 것이 아니며 본 연구에서 가장 커다란 불확실성의 요인이 되었으리라 판단한다. 예민도 분석 등을 통해 이런 자료의 부정확성이 결과에 미치는 영향을 분석하는 것은 다음 과제라 여겨진다.

장치 설계는 제안서에 포함된 자료를 바탕으로 구성한 것이며 현장의 자세한 조건, 즉 건물의 배치, 지장물의 위치, 지하의 지질구조 등이 본 연구에서 분석한 양수 및 처리 시설의 설계에 적절히 반영되지 못한 부분이 많으리라 판단된다. 이에 따른 설계의 부정확성도 존재하리라 판단한다.

전과정평가에서 산출한 환경 편익 및 환경 비용은 금전적인 가치로 산출한 것이 아니며 환경 비용 간의 상호 비교도 부적절하다. 예를 들어 지구 온난화 가스 배출에 의한 지구 온난화 효과와 산성비 원인이 되는 산성 가스의 배출이 환경에 미치는 효과를 직접 비교하는 것은 부적절하다고 판단된다. 다만 본 논문에서는 소모량, 배출량 각 항목의 전세계 일인 연간 배출량, 소모량으로 나누어 표준화한 값으로 간접 비교를 시도하였으나 절대적인 의미를 부여할 수는 없다고 판단한다.

6. 결론

설계에 따라 30년 동안 양수 및 처리 시스템을 운영할 경우 예상한 대로 가장 많은 에너지의 소모는 양수정 내 8개의 양수 펌프를 구동하고 현장 시설을 유지 운행하기 위해 소모되는 전력이며 전력을 생산하기 위한 석탄, 석유, 천연가스, 철강 등 주요 원자재가 소모되었다. 환경으로 배출되는 유해 물질의 배출 역시 전력 생산 공정에서 발생하여 대기로 방출되는 지구 온난화 가스, 산성비의 원인이 되는 산성 가스, 폐수 및 폐수와 함께 배출되는 오염물질 등이 추가 되었다.

환경 편익은 30년 동안 $2.96 \times 10^7 \text{ m}^3$ 의 음용수 기준의 청정한 지하수를 얻을 수 있었다. 오염된 지하수를 정화함으로써 얻어지는 인체 위해도 감소에 따른 환경 편익은 미미한 것으로 사료된다. 생태계 위해도 감소에 따른 환경 편익은 산출하지 않았다. 특히 지하수 및 지표수 생태계에 미치는 환경 영향과 효과는 심도있는 추가 연구가 진행되어야 한다.

많은 오염물 방출의 근본 원인이 전력 에너지의 소비에 있으므로 이 부분을 다른 형태로 전환할 수 있는 방법이 요구된다. 전력 소비가 적은 투수성 반응 벽체나 미생물 정화 공법의 채택이 가능하나 기술적으로 현장 적용성에 대한 선행 연구가 필요하다. 재생 가능한 에너지 즉 태양광발전, 풍력 발전 시설을 현장에 설치하거나 smart grid로의

연결을 고려할 수 있다.

오염 지하수를 정화하여 얻어지는 환경 편익은 정화된 지하수와 매우 제한된 인체 위해도 감소이며 그 효과는 국지적이다. 그러나 이를 얻기 위해 지불하는 환경 비용은 에너지의 소비, 원자재의 소비, 폐수 발생, 대기 오염물 방출, 폐기물의 발생과 같이 광역적이고 그 효과는 전 지구적이다.

환경 정화 사업에서 경제적 편익의 수혜자가 제한적이고 비용의 부담자가 다수일 경우 경제적 편익의 수혜와 비용 부담이 정당하지 못하듯이, 환경 영향 평가에서 계산되는 환경 비용과 환경 편익이 이해 당사자들간에 정당한 결론을 제공하지 못하는 경우가 많으리라고 판단된다. 환경 비용과 편익 항목들의 절대적, 상대적 중요도에 대한 적절한 심층 연구가 이루어져야 할 부분이다.

본 연구는 종래의 전과정평가 같이 제품이나 공정의 상호 비교가 아니라 하나의 제안된 공정, 즉 기술적, 경제적 제한에 의해 다른 선택의 여지가 없는 공정에 대해 환경에 미치는 영향과 효과를 분석하였다. 환경에 미치는 영향 및 효과를 분석함으로써 공정의 개선 방향을 제안하고자 하였다.

사 사

본 연구는 2009년도 가톨릭대학교 교비연구비의 지원으로 이루어졌으며 이에 감사를 드리는 바이다.

KSEE

참고문헌

1. ScanRail Consultant, "Environmental/Economic Evaluation and Optimising of Contaminated Site Remediation, Method to Involve Environmental Assessment," EU LIFE Project No. 96ENV/DK/0016(2000).
2. Overmeyer, P., Gaffne, K. and Goldblum, D., "Green Cleanup Standards," National Brownfield Association, the Big Deal Conference-Phoenix Information Session, Phoenix, AZ(2009).
3. US EPA, "Green Remediation: Incorporating Sustainable Environmental Practices into Remediation of Contaminated Sites," Technology Primer, EPA 542-R-08-002, US EPA, OSWER, Washington, DC(2008).
4. Goldblum, D., "Carbon Calculus," ASTSWMO Mid-year Conference, Mobile, AL(2008).
5. USAF, "Sustainable Remediation Tool, User Guide," US Air Force, AFCEE, Tyndall Air Force Base, FL(2009).
6. Ribbenhed, M., Wolf-Watz, C., Almemark, M., Palm, A. and Sternbeck, J., "Livscykelanalys av marksaneringstekniker för förorenad jord och sediment," 108 Stockholm, IVI Svenska Miljöinstitutet AB(2002).
7. Suèr, P., Nilsson-Påledal, S. and Norman, J., "LCA for Site Remediation: A Literature Review," *Soil and Sediment Contamination*, **13**(4), 415-425(2004).
8. Shakweer, A. F. and Nathanail, P. C., "LCA Methodology

- for Remediation Strategy Slection,” ConSol 2003 8th International FZK/TNO Conference on Contaminated Soil, Gent, Belgium, pp. 12~16(2003).
9. Volkwein, S., Hurtig, H. W. and Klöpffer, W., “Life Cycle Assessment of Contaminated Site Remediation,” *International J. Life Cycle Assessment*, **4**, 263~274(1999).
 10. Diamond, M. L., Page, C. A., Campbell, M., McKenna, S. and Lall, R., “Life-cycle Framework for Assessment of Site Remediation Options: Method and Generic Survey,” *Environ. Toxicol. Chem.*, **18**(4), 788~800(1999).
 11. Owens, J. W., “Life-cycle Assessment in Relation to Risk Assessment: an Evolving Perspective,” *Risk Anal.*, **17**, 359~365(1997).
 12. Vignes, R., “Limited Life cycle Analysis: A Tool for the Environmental Decision-making Toolbox,” *Strategic Environ. Manage.*, **1**, 297~332(1999).
 13. Drunnen, M. A. van, E. Beinet, M.H. Nijboer, A. Haselhoff, M. in’t. Veld, A.R. Schütte, “De RMK-metodiek voor het beoordelen van bodemsaneringvarianten-Een method gebaseerd op Risicoreductie, Milieuverdienste en Kosten,” RMK fas 3. Internetversie(2000).
 14. Bender, A., Volkwein, S., Bettermann, G., Hurtig, H. W., Klöpffer, W. and Kohler, W., “Life Cycle Assessment Method for Remedial Action Techniques: Methodology and Application,” *Contaminated Soil '98, 6th International FZK/TNO Conference*, 1, pp. 367~376, Edinburgh, UK(1998).
 15. U.S. EPA, “Guidance on Remedial Actions for Contaminated Ground Water at Superfund Sites,” EPA/540/G-99/003, OSWER Directive 9283.1-2, U.S. EPA, Washington, DC (1998).
 16. Zheng, C., Bennett, G. D. and Andrews, C. B., “Reply to discussion of analysis of ground-water remedial alternatives at a Superfund site,” *Ground Water*, **30**(3), 440~442(1992).
 17. U.S. EPA, “Evaluation of Ground-Water Extraction Remedies,” U.S. EPA, Office of Emergency and Remedial Response, Washington, DC(1992).
 18. NRC, “Alternatives for Ground Water Cleanup,” National Research Council, National Academy Press, Washington, DC (1994).
 19. Grubb, S., “Analytical Model for Estimation of Steady-State Capture Zones of Pumping Wells in Confined and Unconfined Aquifers,” *Ground Water*, **31**(1), 27~32(1993).
 20. 국가 LCI 종합정보망, 2010, http://www.kncpc.re.kr/lci/lcidb/db_data_layout.asp?cate_id=1&field_value=&Act_id=1&db_flag=M.
 21. Frees, N. and Pedersen, M. A., “Udvikling af miljøvenlige industriprodukter (UMIP), Enhedsproces database,” Institutet for Produktudvikling, Danmarks Tekniske Universitet(1996).