

Biosparging 공법을 이용한 석유계탄화수소화합물 오염토양에 대한 현장적용성 평가

신정엽 · 오경철 · 공 준 · 이승우 · 전기식

(주)에코솔루션(e-mail : jyshin@ecosol.co.kr)

<요약문>

부틸알데히드로 오염된 대상 부지에 Biosparging 공법의 현장 적용을 위해 적정 공기 주입 압력 조건을 도출한 결과, 주 오염층인 자갈질 모래층에 공기주입 가능 파과압력(Pe)은 약 300mmAq로 측정되었으며 4,500mmAq 압력 조건에서는 용존 산소농도의 영향 반경이 약 3 m로 나타났다. 위의 조건을 적용하여 약 150일간 운전한 결과, 영양물질을 투입하지 않은 초기 90일 동안 최고농도 대비 약 90%가 저감되었으며 그 이후에 영양물질을 투입하여 초기 최고 농도 대비 96%가 저감되어 복원목표치인 50ppm을 모든 지역에서 만족시켰다. 또한 생분해 반응속도가 $k=0.03/\text{day}$ 로 나타나 휘발성이 낮고 생분해도가 뛰어난 부틸알데히드로 오염된 자갈질 모래층에 Biosparging공법이 성공적으로 적용된 사례이다.

Key word : Biosparging, 부틸알데히드, 공기 주입압력, 영향반경, 생분해

1. 서론

토양/지하수의 오염은 여러 가지 원인에 기인하며 그 오염원도 매우 다양하다. 이중 석유계탄화수소화합물의 저장/이송시설로부터 유출되어 발생하는 오염이 대부분이라 해도 과언이 아니다. 이러한 지역을 정화하기 위한 대표적인 원위치 복원기술로는 토양증기 추출법(SVE), 생물학적통기법(BV) 등이 적용되고 있으나 비포화대내에 오염된 물질로 그 적용범위가 제한되어있다. 이에 비포화대와 대수층을 동시에 정화할 수 있고 투수성이 양호한 세립토 또는 조립토질에 효과적이며 오염물질이 호기성 조건 하에서 생물학적 분해가 가능할 때 적용이 용이한 Biosparging 공법을 고려하였다. 본 연구는 석유계탄화수소화합 중 부틸알데히드로 오염된 지역을 대상으로 현장특성자료와 Biosparging의 주요설계인자를 산출하고 이를 직접 현장에 적용하여 복원완료 한 사례이다.

2. 대상지역의 오염 특성

복원대상지역은 Y시에 위치한 00화학회사이며 공장부지내 매설되어있는 공정폐수라인의 노후로 인하여 생산 공정에서 사용되고 있는 부틸알데히드가 지하관로 외부로 유출되어 비포화대와 대수층이 오염된 지역이다. 2002년 10월에 실시한 정밀조사 결과, 지하수위는 지표 하 1.4~1.6m,에 존재하였으며 지

하수의 흐름은 남에서 북쪽으로 흐른다. 대상부지의 지질구조는 상부 0.2m 까지 전구간이 콘크리트 포장되어 있으며 심도 0.6m 까지는 자갈층(도로보조기층), 0.6 ~ 4.0m는 자갈질 모래층, 그 이하는 불투수층인 점토층이 존재하고 있다. Fig. 1과 같이 대상 부지의 공정폐수라인 매설깊이인 지표하 1.6m부터 점토층이 나타나는 4.0m 깊이까지 오염이 수직 확산되었고 공정폐수라인을 따라 지하수 흐름 방향으로 약 100m 까지 수평적으로 확산되었다.

Fig. 2과 같이 오염운의 농도분포는 최고오염농도는 1,088ppm, 평균농도는 346 ppm로써 복원목표치인 50ppm이상 오염토양의 양은 1,077m³이다. 이와 같은 오염 분포도를 바탕으로 material balance를 수립한 결과, 부틸알데히드의 총 누출량은 348리터로 예측되었다. 고농도 오염지역(Hot zone)은 산소가스농도가 0.4%, 메탄가스농도가 1.7%로 혐기성 상태를 유지하고 있었으며 확산오염지역은 산소가스농도가 12%, 이산화탄소가스농도 0.25%로 호기성 상태를 보였다. 주 오염층인 자갈질 모래층의 투수계수는 5.7×10^{-5} cm/s, 공극율은 0.2~0.25로 측정되었고 토양의 pH는 8.2~8.5, 부틸알데히드 분해미생물은 $4.25 \times 10^3 \sim 5.43 \times 10^4$ MPN/g, 특히 지하수의 Fe²⁺농도는 Biofouling 현상이 발생하는 기준 농도 10 ppm 미만인 5ppm으로 측정되었다. 이와 같은 부지 특성 및 오염물질의 휘발정도 및 생분해도를 고려하여 경제적이고 효과적인 Biosparging 공법을 선택하여 적용하였다.

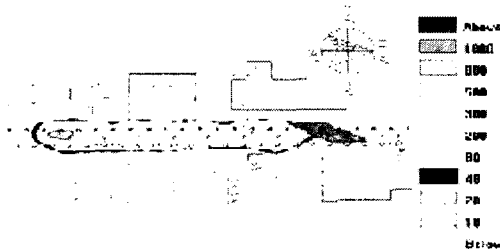


Fig. 1. 부지오염현황(오염심도 2.1m 단면도)

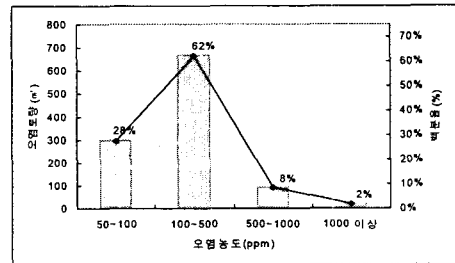


Fig. 2. 농도별 오염토양 양 및 백분율

3. 설계인자 도출을 위한 현장적용성 실험 및 결과

대상 부지의 적용 기술인 Biosparging 설계 시 중요한 영향을 미치는 주입 압력에 따른 영향반경 및 생분해도 실험을 위해 고농도로 오염된 지역을 대상으로 현장 적용성 실험을 실시하였다. 공기 주입정의 스크린 구간은 지표 하 4.0~4.3 m로 설치하였고 용존산소 농도의 변화에 따른 영향반경을 측정하기 위해서 주입정을 중심으로 0.6m 간격으로 6개의 모니터링정을 설치하였다. 그리고 본 실험에 사용한 공기압축기의 사양은 최대주입압력 6,800mmAq이며 주입유량 800m³/hr이다. 주입압력에 따른 영향반경 특성을 파악하기 위한 적정 주입압력은 다음 식과 같이 계산하여 결정된다.

$$P_{soil} = D_t \times \delta_s \times (1 - \phi) \times 9.8 \text{ kN/m}^3; P_{water} = (D_t - D_w) \times \delta_w \times \phi \times 9.8 \text{ kN/m}^3 \quad \text{식 (1)}$$

$$P_h = \rho_w \cdot g (z_s - z_w); P_e = 2 \cdot \sigma / r \quad \text{식 (2)}$$

[D_t = well screen의 시작깊이, D_w = water table의 깊이, δ_s = 토양의 비중, δ_w = 물의 비중, φ = 공극률, ρ_w = density of the water (998.2gm/cm³ at 20°C), g = 중력가속도 (980 cm/sec²), z_w = sparging well내부의 sparging 전 자유수면 깊이 (cm), z_s = sparging well의 screen 시작깊이 (cm), σ = surface tension(gm/sec²) of water in air (20°C, 0.0728 N/m), r = entry의 가장 큰 공극의 반지름(cm)]

위의 식을 이용하여 도출된 적정 공기주입압력은 최대필요압력($P_t = P_{soil} + P_{water}$)의 80%값과 최소필요압력($P_g = P_b + P_c$)과의 사이에서 결정되며 대상 부지의 경우 적정 공기 주입 압력은 3,300 ~ 7,400 mmAq로 계산되었다¹⁾. Fig. 3과 같이 계산된 공기 주입압력을 바탕으로 주입 압력 변화별 공기 주입 유무를 관찰한 결과, 이론값과 근접한 3,400 mmAq에서 10L/min의 공기 주입이 시작되었으며 그 이상의 압력 조건에서 공기 주입 유량의 급격한 증가 현상이 관찰되었다. 그러나 과잉의 공기 주입압력은 Fracturing 현상 및 선회로 현상을 발생시키므로 이상적인 공기 주입 흐름을 형성시키기 위한 최적의 주입압력을 도출하기 위한 실험이 필요하였다. 이에 용존산소 농도 측정으로 압력 별 영향 반경 실험을 실시한 결과(Fig. 4), 주입압력 4,500 mmAq, 주입 유량 80 L/min 조건에서 영향 반경 약 3m로 용존산소 농도 2ppm 이상 호기성 조건이 유지되는 것으로 나타났으며, 그 이상 주입 압력에서는 영향반경에 큰 변화가 나타나지 않아 최적의 운전 조건으로 선택하였다.

부틸알데히드의 생분해율을 측정하기 위해 Bench-scale 호흡을 실험을 실시하였다. 대상 부지의 C:N:P의 비는 100:5:1의 조건으로 인위적으로 조절하였고 별도의 미생물은 주입하지 않았다. 대상 부지의 지중 온도 조건인 20℃에서 4주 동안 실시한 호흡 실험 결과, 반응속도상수는 $k=0.0097/\text{day}$ 로 산소 소모율을 부틸알데히드 농도로 환산하여 추정하였을 때 복원목표 농도인 50ppm 까지 저감되는 데 약 320일이 소요되는 것으로 나타났으나 안전율(1.2)을 고려하여 복원목표기간을 약 380일로 산정하였다(Fig 5. 참조).

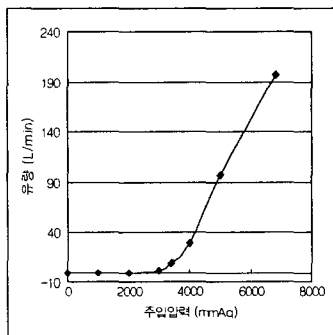


Fig. 3. 압력에 따른 유량변화

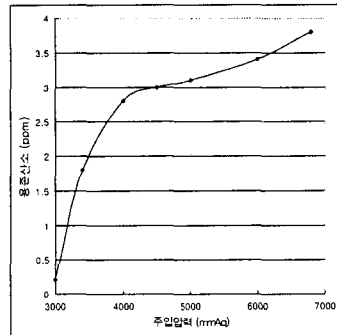


Fig. 4. 주입압력별 DO농도

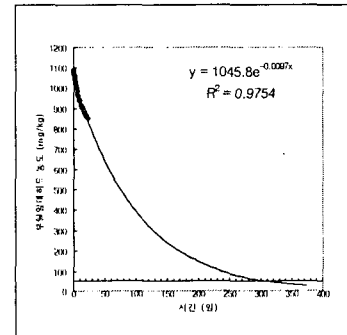


Fig. 5. 복원기간의 예측

4. 결론

위의 현장 적용성 실험 결과를 적용하여 대상지역에 공기주입정은 설치 깊이 4.3m, 설치 간격 6m로 2열 배치하고, 공기 주입정 가운데 모니터링정을 배치하는 방식으로 시공하여 10개월 동안의 운전 및 모니터링을 실시하였다.

부틸알데히드 분해 미생물의 생육환경을 최적화하기 위해 ORP 100 ~ 200 mV, pH 7 ~ 8, 수온 20 ~ 25 ℃, 용존산소 농도는 2 ppm 이상으로 유지시켰다, 대상 오염물질의 저감 추이를 판단하기 위해서 CO₂ 가스 농도 및 토양시료 채취 및 분석을 주기적으로 실시하였다. 초기 운전 시 영양물질을 주입하지 않은 조건에서 CO₂ 가스 농도는 Fig. 6과 같이 0.1~0.3% 정도로 측정되었고 부틸알데히드의 토양오염 농도는 초기 90일 기간동안 최고 농도 대비 약 90%가 급격히 저감되었다. 그리고 90일 이후에는 저감 곡선상의 tailing effect가 두드러지게 나타나 영양물질을 인위적으로 주입하여 C:N:P의 비를 100:5:1로 조절한 결과 Fig. 6과 같이 CO₂ 가스 농도의 발생량이 초기 운전 조건 대비 2배 이상 증가하는 결과를 관찰할 수 있었다. 전체적으로 고농도 오염지역이 확산 지역인 저농도 지역에 비해 CO₂ 발생 농도가 높게 유지되었으며 총 운전기간 150일 동안 모든 지역에서 복원목표치인 50 ppm 이

하로 저감되었고 평균농도 16 ppm으로 측정되어 초기 평균농도 대비 96%가 저감되었다.

Fig. 7의 결과를 볼 때 실측된 반응속도가 초기예측치 보다 약 3배정도 빠른 결과가 도출되어 복원목표가 성공적으로 조기에 달성되었다. 위의 복원 사례에서 알 수 있듯이 Biosparging 공법은 생분해가 가능한 비휘발성 석유계 탄화수소화합물에 탁월한 적용성을 나타내었으며 대상 오염지층인 자갈층 모래층의 공기 주입이 가능한 파과 압력(P_e , air entry pressure)은 공기 주입정 수두 압력(P_h)을 고려하여 대략 300mmAq임을 알 수 있었다.

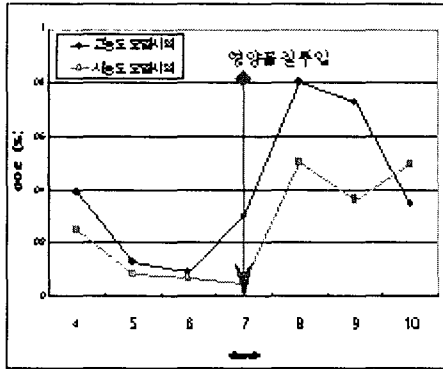


Fig. 6. 오염지역별 CO2 발생농도의 변화

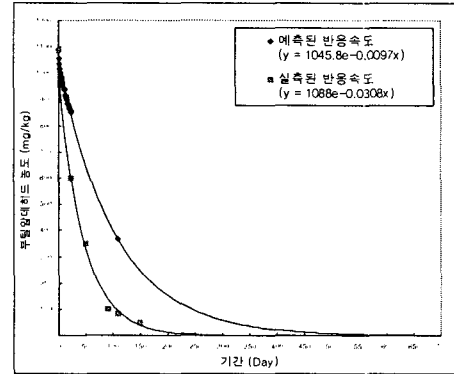


Fig. 7. 예측/실측된 복원기간 비교

참고문헌

- 1) "Engineering and Design IN-SITU AIR SPARGING", EM1110-1-4005, U.S. Army Corps of Engineers, 1997.9.15
- 2) Ralinda R. Miller, P.G., "Air Sparging", TO-96-04, Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center, 1996. 10