

## 토양/물 계에서의 산소 전달속도와 미생물 분해속도

우승환<sup>1</sup>, 박종문<sup>1</sup>, 장원용<sup>2</sup>, 이광표<sup>2</sup>

<sup>1</sup>포항공대 환경공학부, 화학공학과

<sup>2</sup>삼성물산(주) 건설부문 기술연구소

### 서 문

산업혁명 이후 세계각국은 산업화를 통한 발전에 가장 큰 역점을 두고 지구상의 다양한 자원을 단기간에 소모시켜 왔다. 그 결과 결보기 발전지수는 급속도로 증가하였으나 산업체의 오염물질 배출량 급증, 화석연료의 사용량 증가, 무리한 개발계획에 따른 자연과피 등 심각한 후유증에 시달리고 있다. 특히 인간생활의 근간이 될 수 있는 토양의 오염은 노출속도가 느리고 전달경로가 복잡하여 오랜 기간 방치되어 왔던 것이 사실이다. 그러나 현재에 이르러서는 유류 선박사고에 따른 해양 및 연안오염, 주유소 저장탱크, 폐기물 매립지, 송유관 주변, 공장지역 등의 오염문제가 심각하게 대두되고 있어 이들 오염지역의 복원이 절실히 요구되고 있는 실정이다.

선진국에서는 이러한 오염지역 복원사업이 오래 전부터 진행되고 있는데 여기에 동원되는 기술은 화학적 기술, 생물학적 기술, 소각 기술, 안정화 기술 등 가능한 모든 기술이 시도되어 왔으며 현재 새로운 기술들이 활발하게 연구되고 있는 중이다. 이러한 기술 중에서도 생물학적 복원기술이 경제적이면서도 환경친화적인 점이 부각되어 그 적용범위가 점차 확대되고 있는 추세이다. 현재 생물학적 복원기술은 landfarming, composting, bioventing과 같은 다양한 기술들이 개발 적용되고 있는데 특히 bioreactor 기술이 유해물질의 분해속도가 가장 빠른 것으로 알려지고 있다. Bioreactor를 사용하는 경우 단위 부피당 처리 토양의 용량이 증가할수록 효율은 증가할 것이다. 그러나, 토양 함량이 증가할 경우 점도가 증가하고 혼합효율이 떨어지는 현상이 일어나는 것으로 알려지고 있다. 따라서, 현장적용의 경우 주로 20~40%의 토양함량에서 처리가 이루어지고 있다.

토양 슬러리에서의 산소전달은 토양의 함량, 토양의 크기, 토양의 종류 등에 영향을 받을 것이다. 현재까지 고체입자를 포함하는 bioreactor에서의 산소전달현상에 대한 많은 연구결과가 보고되고 있다. 그러나, 이들은 주로 activated carbon, coal, glass bead, polymer additives 등에 대한 연구였다. 실제 토양에 대한 연구는 미흡한 실정이며, 따라서 이러한 계에서 산소전달속도를 조사하고 오염토양복원에 적용될 경우의 연관성을 검토할 필요가 있다. 본 연구에서는 2종류의 실제 토양과 2종류의 판매토양, 그리고 activated charcoal에 대해서 산소전달속도를 조사하였다. 이때 각 고체시료에 대해 첨가량과 공기주입량을 달리하면서 그 영향을 관찰하였다. 또한 bioremediation을 통해 오염물질을 제거할 경우를 모사하여 필요한 산소전달계수를 구하였다. 이러한 결과를 실험결과와 비교하여 산소전달이 제한요소가 되는 상태를 조사하였다.

### 실험방법 및 장치

#### 토양

본 실험에서는 4종류의(Soil S, Soil R, Soil Bs, Soil Bc) 토양과 activated charcoal이 사용되었다. Soil S는 본교 운동장에서 채취한 토양이며 Soil R은 야산 나무뿌리 주변으로부터 채취한

토양으로 일주일 간 자연 건조시킨 후 입자크기 0.5mm 이하를 실험에 사용하였다. Soil Bs는 동해화학으로부터 구입한 silt성 토양이며 Soil Bc는 Sigma에서 구입한 bentonite이다. 또한 Fluka에서 구입한 activated charcoal을 실험에 사용하였다. 토양 시료에 대해서는 유기물 함량, 토성, 물포화량을 조사하였다. 이러한 결과는 표 1에 나타내었다.

#### 생물반응기

산소전달계수를 측정하기 위한 모델 생물 반응기는 KFC stirred tank reactor를 (Korea Fermentor Co., Ltd.) 사용하였는데 six-blade turbine형의 impeller가 장착된 5L 부피를 (내경 164mm, 높이 234mm) 가진 것이다. 반응기 바닥에 있는 12개의 1mm hole을 통해 공기가 공급되도록 되어 있다.

#### 산소전달계수 측정

용존산소 농도는 polarographic oxygen electrode (Ingold, US)를 사용하여 측정하였다. 반응기에 물 5L와 토양시료를 0에서 40%까지 넣고 공기공급속도를 달리하며 산소전달계수를 측정하는 실험을 수행하였다. 실험을 수행하기 전에 질소로 슬러리내의 산소를 제거한 후 다시 공기를 공급하여 시간에 따라 용존산소 농도를 측정하였다.

#### 결과 및 고찰

##### 산소전달계수( $k_La$ )

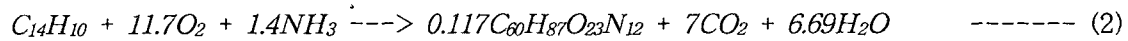
산소전달계수 적절한 측정을 위해서는 용존산소 계측기의 응답속도와 산소의 체류시간이 산소전달 시간보다 작아야 한다. 본 실험에서는 계측기의 응답속도는 최장 60초, 산소 체류시간은 약 12초로서 실험시 최저 산소전달 속도는 ( $1/k_La$ ) 100초보다 작으므로 위의 조건을 만족시켰다. 그림 1에 Soil S에 대한 실험결과를 나타내었다. 토양함량이 증가할수록 산소전달계수는 조금씩 감소하였다. 토양함량 40%에서는 토양이 첨가되지 않은 물에서의 산소전달계수보다 약 60~70%의 수준으로 떨어졌다. Soil R과 Soil Bs에서도 이러한 현상이 관찰되었고 산소전달계수의 감소하는 정도도 유사하였다. 이것은 토양의 유기물 함량이 약 15%까지는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 보인다. 활성탄이나 석탄의 경우 산소흡입자가 흡착하는 현상이 일어나 산소전달계수가 급격하게 감소하는 것으로 나타난다고 알려져 있다. 그러나 토양의 경우는 유기물의 함량이 높아도 산소의 흡착으로 인한 급격한 산소전달계수의 감소는 그리 높은 수준은 아닌 것 같다.

한편 Soil Bc의 경우에는 그림 2와 같이 토양함량이 증가할수록 산소전달계수는 급격하게 감소하였다. 토양함량이 5%에서조차도 물에서의 값의 40% 수준으로 떨어졌다. 이 토양의 (bentonite, clay) 경우 10%정도의 함량이면 슬러리의 점도가 증가하여 혼합이 원활하게 이루어지지 않을 정도였다. 이와 같이 일반적으로 고체 슬러리에서의 산소전달계수의 감소는 bubble coalescence에 의한 현상인 것으로 알려져 있으며 본 실험에서도 그러한 현상이 관찰되었다. 따라서, 토양 슬러리에서의 산소전달속도는 입자크기가 매우 작은 clay의 함량에 크게 의존하는 것으로 보이며 실제 오염토양의 생물학적 복원에서 이러한 사실에 유의해야 할 것이다.

##### 산소전달계수 요구량의 계산

유기성 유해물질의 분해속도는 1차로 가정하였다. Mineralization 비는 50%로 가정하고, 일반적인 미생물의 화학성분을 도입하였으며 대표물질인 phenanthrene에 대한 stoichiometry 식을 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{dS}{dt} = -kS \quad \text{----- (1)}$$



산소전달 요구량은 다음과 같이 maximum oxygen uptake rate에서 구할 수 있다.

$$OUR = Y_{O_2/S} kS \quad \text{----- (3)}$$

$$OTR_{min} = OUR_{max} = OUR[S_{max}, k_{max}] = OUR[S'_o, k_{max}] \quad \text{----- (4)}$$

$$k_L a_{req} = \frac{OUR_{max}}{(C^*_{O_2} - C_{O_2, crt})} \quad \text{----- (5)}$$

다양한 오염농도와 bioreactor내 토양함량에 대해 산소 요구량을 예측한 결과와 1 vvm에서의 실험결과를 그림 3에 나타내었다. 약 1000mg/kg이하의 phenanthrene으로 오염된 토양에 대해서는 40%의 토양함량에 대해서도 산소전달은 충분한 것으로 예측되었다. 그러나, clay를 다량으로 포함하는 토양에 대해서는 낮은 토양 함량, 낮은 오염농도에서도 산소전달이 율속단계일 가능성이 있을 것으로 예상된다. 따라서 이러한 경우에는 산소전달을 증가시키기 위해 공기주입속도나 교반속도를 증가시켜야 할 것이다.

## 결 론

본 연구를 통해 실제 토양 슬러리에서의 산소전달계수는 토양 첨가량에 따라 조금씩 감소하는 경향을 보였으며 특히 입자 크기가 작은 clay의 함량이 큰 영향을 미쳤다. 산소전달 요구량을 예측한 결과 고농도로 오염된 토양일수록 토양함량이 증가할수록 산소전달이 율속단계일 가능성이 증가하였다.

## 참고 문헌

1. Boon, M. C., Meeder, T.A., Heijnen J.J., and Luyben K.Ch.A.M. (1992), *Biotech. Bioeng.*, 40, 1097-1106
2. "Superfund innovative technology evaluation program: technology profiles seventh edition", EPA/540/R-94/526 (1994)
3. Wilson S. C. and Jones K. C., *Environmental Pollution*, 81, 229-249 (1993)
4. Schumpe, A., Saxena, A.K., Fang, L.K., (1987), *Chem. Eng. Sci.*, 42, 1787-1796
5. "Pilot-scale demonstration of a slurry-phase biological reactor for creosote- contaminated soil", EPA/540/A5-91/009 (1993)

Table 1. Properties of soils in the experiments.

	Soil S	Soil R	Soil Bs	Soil Bc
Texture	Loamy sand	Silt loam	Silt	Clay
Sand	84%	18%	14.5%	8%
Silt	18%	80.6%	84%	37%
Clay	1%	1.4%	1.5%	55%
Water Saturation (mL/g)	0.36	0.52	0.89	9.5
Organic matter	1.1%	6.1%	14.5%	-

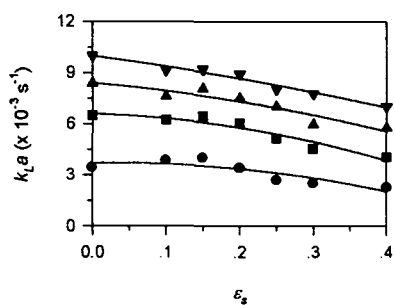


Fig. 1.  $k_L a$  values of slurry with various content of soil S at different air flow rates.

● 0.25vvm    ▲ 0.75vvm  
 ■ 0.5vvm    ▼ 1vvm

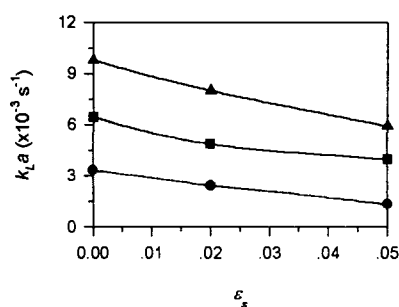


Fig. 2.  $k_L a$  values of slurry with various content of soil Bc at different air flow rates.

● 0.25vvm    ▲ 1vvm  
 ■ 0.5vvm

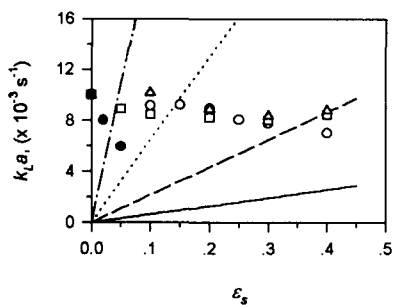


Fig. 3. Comparison of  $k_L a_{exp}$  values at 1 vvm with estimated  $k_L a_{req}$  at various initial soil contaminations and soil hold-up.

○ soil S    —  $S_o' = 300\text{mg/kg}$   
 □ soil R    - -  $S_o' = 1000\text{mg/kg}$   
 ▲ soil Bs    ····  $S_o' = 3000\text{mg/kg}$   
 ● soil Bc    - · -  $S_o' = 10000\text{mg/kg}$