

## 방사성 오염토양의 제염 처리 기술 현황

권기현, 김병태, 김대환, 홍지식, 임유경, 김기홍, 조성일  
 선광원자력안전(주), 대전광역시 유성구 용산동 553-2  
[forever99k2@gmail.com](mailto:forever99k2@gmail.com)

### 1. 서론

1959년 국내에 원자력이라는 씨가 뿌려진 이후 50년 동안 국내의 원자력 산업은 눈부신 성장을 이루어, 현재 원자력발전이 국내 전력생산의 37%를 차지하고 있으며, 정부의 '저탄소 녹색성장' 정책과 성격이 맞아 떨어지면서 2030년에는 원자력발전을 국내 전력생산의 59%로 크게 높여나갈 계획에 있다. 그러나 이러한 원자력 분야의 성장과 함께 해결해야 될 문제로 원자력시설 부지의 환경오염문제이다. 원자력시설 주변의 토양은 원자력시설의 가동, 해체, 그리고 사고로 인하여 방사성핵종으로 오염될 가능성이 크므로, 이러한 오염토양을 일반 환경에 노출할 수 있도록 청정화 시키는 기술이 함께 확보되어야 한다.

방사성 오염토양을 제염하기 위한 방법으로 물리·화학적 방법, 동전기적 방법 그리고 생물학적 방법 등을 포함한 다양한 기술들이 연구·개발 되고 있으며, 아울러 이러한 토양제염의 연구·개발 성과는 효율성과 경제성이 함께 뒷받침 되어야만 한다. 기존의 방사성 오염토양의 제염법으로는 토양세정(Solvent Flushing), 토양세척(Solvent Washing) 등을 이용한 제염기술들이 보고되고 있으나, 투수성이 낮은 오염토양에서는 제염 효율이 떨어지며, 세정·세척에 의한 2차 액체폐기물 발생으로 후처리 비용이 발생하는 등의 단점이 있다. 이러한 효율성과 경제성의 측면에서 방사성 오염토양을 제염하기 위한 처리기술이 개발되어야 할 것이다.

### 2. 본론

#### 2.1 국내의 방사성 오염토양 및 처리현황

원자력시설이 있던 부지의 토양은 Co-60, Cs-137, 그리고 Sr-90 등과 같은 방사성핵종으로 오염될 가능성이 매우 크다. 현재 한국원자력연구원 내에 보관중인 오염토양 드립 수량은 약 5,000여 드립으로, 이는 TRIGA 연구로와 변환시설 등의 원자력시설 해체 시 발생한 오염토양 드립 수량이다. 또한 원자력 발전소 내에도 약 1,000여 드립의 오염토양이 보관되어 있으며, 향후 원자력발전소 등의 원자력시설 해체 시 다량의 방사성 토양 및 방사성 콘크리트가 발생할 것으로 예상된다.

이중 한국원자력연구원 내에 보관중인 TRIGA 연구로의 오염토양을 살펴보면, 순수토양과 토양-콘크리트의 혼합형태 등으로 분류되어 비닐에 포장되어 드립에 보관되어 있다. [표 1.]은 1988년도의 표면 접촉선량률에 따른 TRIGA 연구로의 오염토양 드립의 수량을 나타내었는데, 0.5 이하의 낮은 선량률 드립은 약 4천여 드립이며, 현재 20여년이 지난 지금 방사능 농도 또한 많이 낮아졌음을 감안할 때, 제염을 통한 자체처분을 할 경우 상당량의 폐기물 처분비용을 절감할 수 있을 것이다.

표 1. TRIGA 연구로 오염토양의 표면 접촉 선량률에 따른 드립 개수(1998년)

표면 접촉 선량률 (mR/hr)	0.2 이하	0.2 ~ 0.5	0.5 이상
드립 개수(200 l/drum)	1,474	2,675	333

#### 2.2 방사성 오염토양 제염 처리방법

##### 1) 추출제를 사용한 초임계 이산화탄소 토양 제염기술

초임계 이산화탄소를 이용하여 우라늄 오염토양을 건식제염을 할 경우, 기존 토양 제염 과정에서 발생하는 2차 폐기물 발생을 근본적으로 억제하는 기술적 특징을 지니고 있다. 극성인 우라늄을 비극성인 이산화탄소로 추출하기 위해서는 초임계 이산화탄소 하에서 추출제를 사용해야 한다. 추출제로는 TBOD(*N,N,N',N'*-Tetrabutyl-3-oxapentanedianimide)와 TBP(Tri-*n*-butyl phosphate) 등을 사용하며, TBOD와 함께 보조추출제로 IPA(Isopropyl Alcohol), Butanol을 사용하기도 한다. 모의실험 결과 TBOD를 단독으로 사용한 경우보다 TBOD와 보조추출제를 함께 사용한 경우, 제염 효율이 더 높게 나타남을 보이고 있다.

## 2) 화학 침출제를 사용한 초음파 제염기술

우라늄과 토륨 및 라듐과 같은 중금속을 제거시킬 때 많은 침출제가 이용되고 있다. 일반적인 침출제로는 중탄산염, 탄산염, 염산 그리고 황산 등이 이용되고 있다. 이러한 침출제를 사용하는 과정에서 침출을 용이하게 하기 위해 기계적 혼합방법을 이용한다. 그러나 이러한 기계적 혼합방법은 장시간이 경과해야 미세 혼합 효과가 크게 나타나기 때문에 장시간의 접촉시간과 거대한 탱크가 필요하다. 이는 시간과 비용적인 손실로 연결된다. 이러한 손실을 줄이고자 초음파와 에너지를 이용한 제염기술이 연구되고 있다.

초음파 제염의 원리는 침출제가 혼합된 오염토양에 초음파를 가함으로써 기포를 형성하여 토양과 화학첨가제 사이에 미세 혼합 효과를 강화시켜, 오염물질 제거의 효과를 더욱 높이는 것이다. 초음파 혼합은 단시간에 빠른 반응 효과를 볼 수 있어 시간과 비용 면에서 매우 유리하다. 한 예로 Sr-90으로 오염된 토양을 초음파 침출실험에서 10초~20초로 접촉시킨 경우 30~40%의 Sr-90을 제거했으나, 기계적 혼합의 경우 30분~60분의 긴 접촉 시간으로도 Sr-90을 20~30%밖에 제거시키지 못한 연구가 보고되었다. 또한 초음파 혼합 과정에서 온도는 23~30℃보다는 40℃의 높은 온도일 때 제염 효율이 증가되는 경향을 보였다. 화학첨가제로는 산성, 알칼리성, 킬레이트성 시약 중 산성 물질이 가장 효과적으로 나타났다. 그러나 이러한 초음파 침출 제염의 경우 제염된 토양을 물로 세척해야 하기 때문에 2차 액체폐기물이 발생하는 문제점이 있다.

## 3) 동전기적 제염기술

동전기적 제염기술은 전극 사이에 오염토양이 위치하고, 직류전원을 흘리게 되면 오염물이 이온 특성에 따라 전극 쪽으로 이동하는 특성을 이용한 제염방법이다. 오염물질의 이동 방법은 전기이동, 전기삼투, 그리고 전기영동을 이용하여 토양을 제염한다. 동전기적 제염방법은 토양의 수리전도도와 투수성이 낮은 미세 입자토양(토양입경 0.063mm 이하)에 적합하여, 2차 폐기물 발생이 적다는 장점이 있는 반면, 토양 내 금속성 물체가 없어야 하며, 발생 수소가스의 폭발 위험성, 전기사용에 따른 높은 운영비, 투수성 높은 토양의 제염 난해성, 그리고 토양 내 수분함량이 낮을 경우 정화효율이 낮아진다는 단점을 지니고 있다.

## 4) 동전기세정 제염기술

동전기적 제염기술은 수리전도도와 투수성이 낮은 오염토양에 적합한 제염방법이지만, 수리전도도와 투수성이 높은 오염토양에 대해서는 제염 효율성이 떨어지게 된다. 이를 해결하기 위한 방법으로 최근 동전기세정 제염기술이 연구·개발되고 있다. 이는 국내 원자력시설 주변의 토양이 수리전도도가 높은 점을 감안하면 방사성물질을 좀 더 효율적으로 제거하기 위한 방법이 될 것이다. 세정용액으로 초산 등을 사용하며, 펌프를 이용한다는 점이 동전기적 제염장치와 다른 점이다. 연구보고에 따르면 투수성이 높은 오염토양의 경우, 동전기적 제염방법보다 동전기세정 제염방법이 코발트는 6%, 세슘은 2% 높은 제거효율을 보였다.

## 3. 결론 및 전망

앞에서 토양 제염기술을 살펴 본 바와 같이 토양 제염기술은 각각의 장단점을 지니고 있으며, 이러한 제염기술 개발의 가장 중요한 가치평가는 제염의 효율성과 경제성일 것이다. 제염기술에 따른 제염효율, 제염시간, 제염비용, 그리고 2차 폐기물 발생량 등 이러한 제염인자를 결정하는 요인은 토양의 지질 특성에 기인한다. 토양 입자의 크기, 토양의 흡·탈착성 등에 따라 기존 제염기술을 적용하거나 혹은 동전기세정 방법과 같은 새로운 복합 제염공정을 통하여 오염토양을 제염해야 할 것이다.

그리고 향후 원자력시설 해체에 따른 방사성 오염토양과 방사성 콘크리트가 다량 발생하게 될 것이다. 특히, 방사성 콘크리트의 경우 일반적인 수세로 제염이 어려울 경우, 분쇄 및 파쇄 과정 등을 거쳐 오염토양 제염법을 적용할 수 있을 것이다. 이는 해체 콘크리트의 부피를 줄임으로써, 오염토양 제염과 더불어 방사성폐기물 처분장의 공간 확보와 처분비용 절감의 효과를 기대할 수 있을 것이다.