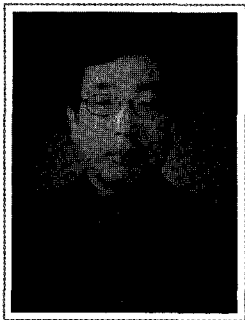


# 방사능 오염 표면 정화용 제염제

안 병 길

한국원자력연구소 핵화공연구팀 선임연구원



**인** 류의 평화적인 이용을 위해 상업용 원자로가 건설된 이후 다양한 가동 경험의 축적과 관리를 철저히 함으로써 원자력 산업의 안전성은 비약적으로 향상되었다. 또한 원자력발전소에 대한 부지 선정·설계·운전·해체·방사성 폐기물 처분 등에 대한 모든 작업은 환경을 보호하고 작업자와 국민의 안전을 보장하

기 위해 국제적인 엄격한 규정과 요구 사항을 만족시키며 이루어지고 있다.

따라서 심각한 오염 사고 발생 가능성이 매우 낮지만, 수용할 수 없을 정도의 방사성 물질의 누출 및 피폭에 대한 잠재성은 전적으로 배제할 수 없음을 Three Mile Island(TMI-2) 및 체르노빌 원전 사고로부터 알 수 있다.

이러한 사고로부터 공공 및 생활 환경을 보호하기 위하여 위급 상황 시 수행되어야 할 절차 및 사고 후 생활 환경으로의 복구를 위한 사전 계획의 수립은 원자력의 평화적 이용에 있어서 필수 불가결한 과제 중의 하나이다.

체르노빌 원전 사고는 그 규모가 워낙 컸기 때문에 오염 지역의 제염 복구 개념을 바꾸는 계기가 되었다. 그 전에는 소량의 방사성 물질 누출

에 의한 오염원을 제거하기 위한 국부적인 제염 기술이 주로 연구되었다.

따라서 고효율 여과기에 의해 배기 가스가 처리되는 환기 시설 내에서 또는 고립된 지역에서 제염 공정이 이루어지므로 사용되는 제염제의 특성 또한 작업자 및 환경 위해도에 대한 제한성이 거의 배제되고 효율 위주의 제염제 개발에 목적을 두었다. 따라서 이러한 목적의 제염제들은 가격이 비싸고 생태계에 유해한 물성을 지니고 있으므로 생활 환경으로의 복구를 위한 제염제로 활용되기 어렵다.

오염된 표면을 제염하는 과거의 방법에는 건식, 습식, 고분자 용액을 이용하는 방법 등이 있다.

건식 제염에는 진공 흡인법, 모래 분사법 등이 있는데 진공 흡인법은 물리적으로 부착된 입자성 오염

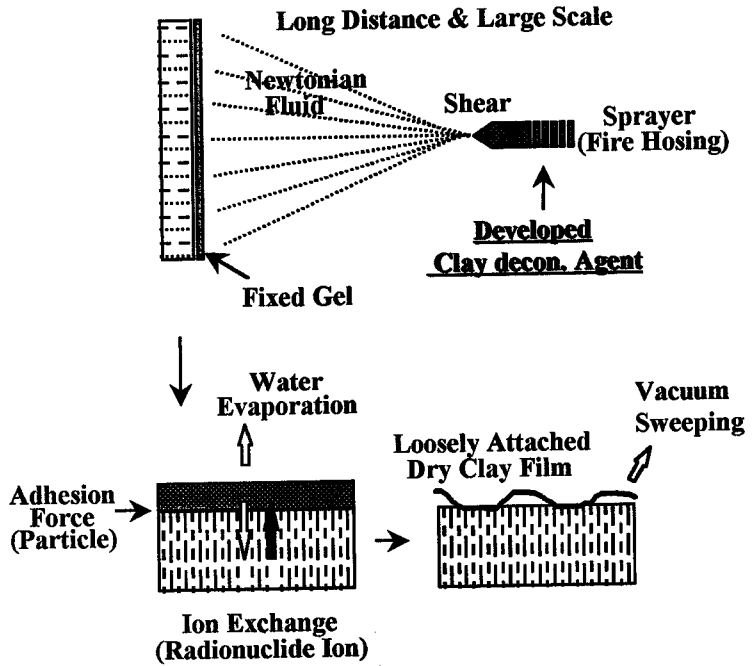
원을 흡입하여 처리하는 방법으로 이온 형태로 흡착되어 있는 핵종을 제염할 수 없다는 단점이 있다.

모래 분사법(sand blasting)은 모래를 고압 공기로 분사하여 오염 표면을 연마시켜 방사성 물질과 오염 표면을 함께 제거하는 것으로 제염 효과가 낮고 오염 표면을 훼손시킬 뿐만 아니라 방사성 물질이 포함된 미세 분진이 다량으로 발생되므로 집진 처리하는 고가의 장치가 필요로 하는 등의 단점이 있다.

습식 제염은 체르노빌 원전 핵사고 오염 지역의 복구에 있어서 생활 환경과 가장 밀접한 도시 지역의 오염 표면 제염에 주로 사용된 방법으로 물 또는 화학 용액을 대단위로 분사하여 세척에 의해 오염원을 제거하였다.

그 결과 제염 후 세척 용액은 방사성 액체 폐기물이 되어 주변 지역 및 하수 계통을 심각하게 오염시켰다.

고분자 용액을 적용하여 오염 표면을 제염하는 방법(strippable coating)은 제염 후 고분자 건조막 제거의 어려움, 제염제가 가연성이므로 화재로 인한 방사성 물질의 비산 위험성과 고가의 고분자물을 써서 비용이 많이 든다는 단점이 있다. 따라서 기존 제염제들의 단점을 개선하여 생활 환경으로의 복구에 적합한 제염제 개발이 절실하다.



〈그림 1〉 방사능 오염 표면 정화 공정

**제염제 제조 및 특성**

이러한 목적에 적합한 저렴하고 제염 효과가 크고 2차 오염 위험성이 없는 제염제로서 국내산 점토를 기본 물질로 한 제염제를 개발하였으며, 한국과 영국에 특허로 등록되었다.

개발된 제염제는 상온에서 겔상으로 존재하므로 분사 장치, 도포용 롤러, 붓 등을 사용하여 오염 표면에 도포하고 자연 건조된 후 느슨하게 붙어 있는 점토 박막을 진공 흡인기 등으로 회수함으로써 방사능에 오염된 표면을 용이하게 정화할 수 있다.

제염제를 방사능 오염 표면에 도포하면 오염 입자는 부착력에 의해서, 이온성 오염원은 이온 교환에 의해서 오염원이 제거된다.

특히 정체 상태에서는 점성을 갖는 겔상을 유지하지만 분사시에는 전단력에 의하여 점도가 크게 감소하는 유변학적 특성을 지니므로 기존 소방 설비를 사용하여도 낮은 분사 에너지를 써서 원거리까지 대량으로 도포할 수 있다는 특징이 있다.

그러므로 단시간에 제염 작업을 진행할 수 있어 작업자의 피로를 최대한 줄일 수 있다(그림 1).

일반적으로 점토 광물은 스펙타

이트계로서 몬몰리로나이트 성분이 대부분이고 그 외 여러 불순물이 포함되어 있다.

몬몰리로나이트의 결정 구조는 Si-O의 사면체층(tetrahedral sheet)과 Al-O-OH의 팔면체층(octahedral sheet)의 조합으로 구성되어 있다.

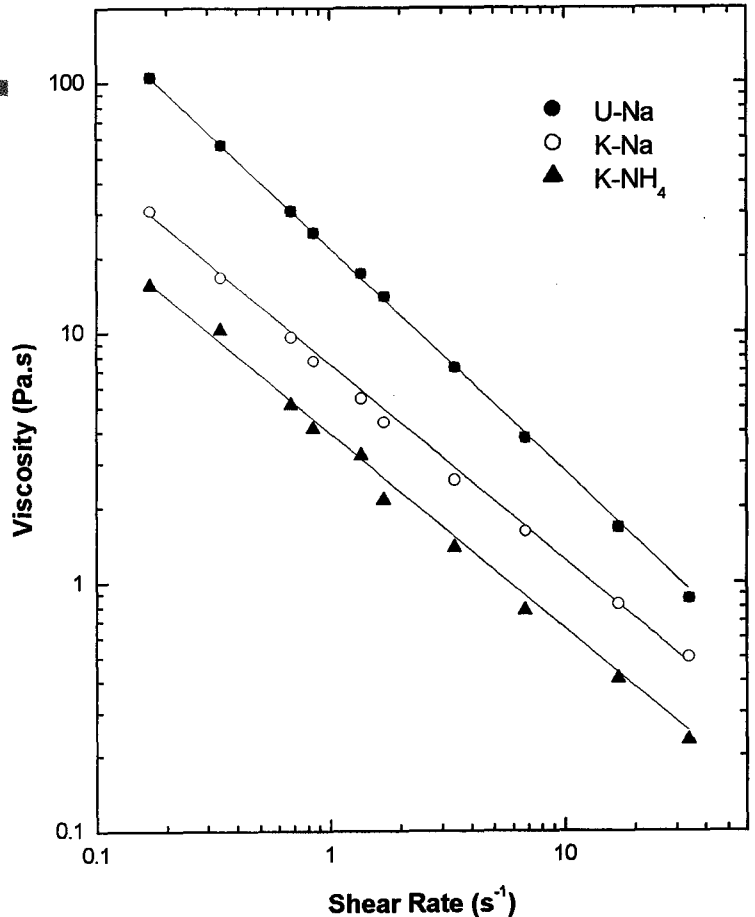
이러한 결정 격자 내에 존재하고 있는  $Si^{+4}$ ,  $Al^{+3}$  및  $Mg^{+2}$  중 일부가 이보다 원자가가 낮은 이온으로 치환되면, 전하의 부족으로 입자 표면은 부정하를 띠게 되며 이를 보충하기 위한 수단으로 층과 층 사이에 교환성 양이온이 존재하게 된다.

일반적으로 자연계에서 산출되는 점토에는 교환성 양이온으로  $Ca^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $Mg^{2+}$  등이 존재한다.

개발된 제염제는 점토의 칼슘 이온을 암모늄 이온으로 치환하고, 치환된 점토가 수용액상에서 침전되는 현상을 방지하고 팽윤성 및 점착성을 높이기 위해서 수용성 고분자와 핵토라이트 분말을 첨가하여 안정화된 제염제이다.

암모늄 이온은 높은 표면 전하 밀도, 수화 반경 등의 특성을 갖고 있어 세슘 이온과 치환하는 효과가 우수하다.

그러나 암모늄 이온과 같은 전해질을 첨가하면 판상의 점토 입자 모서리에 존재하는 이온과 화학적으로 반응하여 모서리의 전하가 바뀌어 전기 이중층이 제거되며 이로 인



〈그림 2〉 전단 속도에 따른 점도 변화

해 응집 현상이 일어나 점토가 침전되게 된다. 따라서 이러한 현상을 방지하여 안정된 겔형 제염제를 제조하는 것이 중요한 관건이 된다.

기존 및 개발된 제염제의 특성 비교를 위해서 Na형(K-Na) 및 암모늄으로 치환한(K-NH<sub>4</sub>) 국내산 점토와 Na형 우크라이나 점토(U-Na)를 수용액상에 분산시켜 제염제로 사용하였다.

제염제의 유동 특성을 살펴보기 위해 전단 속도(Shear Rate)의 변화에 따른 점도 변화를 나타낸 〈그림 2〉를 보면 양 대수 좌표에서 점단속도 증가에 따라 점도가 선형으로 감소하는 특성을 보이며, 실제 스

프레이 작업으로 점토 분산액을 분사시 적용되는 전단 속도(shear rate)는  $10^3$ 에서  $10^4 sec^{-1}$  이므로 이 구간까지 외삽하면 매우 낮은 점도가 됨을 알 수 있다.

따라서 낮은 분사 에너지로서 대상 오염 표면을 제염제로 쉽게 도포할 수 있다. 암모늄 치환 제염제의 경우도 Na형 제염제와 유사한 거동을 보이므로 안정된 분산상을 유지함을 확인할 수 있다.

핵종별 제염 특성을 보기 위하여 체르노빌 원자력발전소 사고 지역 10km 반경 내에 있는 hot-spot에서 토양을 채취하여 질산 및 과산화 수소 용액으로 처리하여 얻어진 방



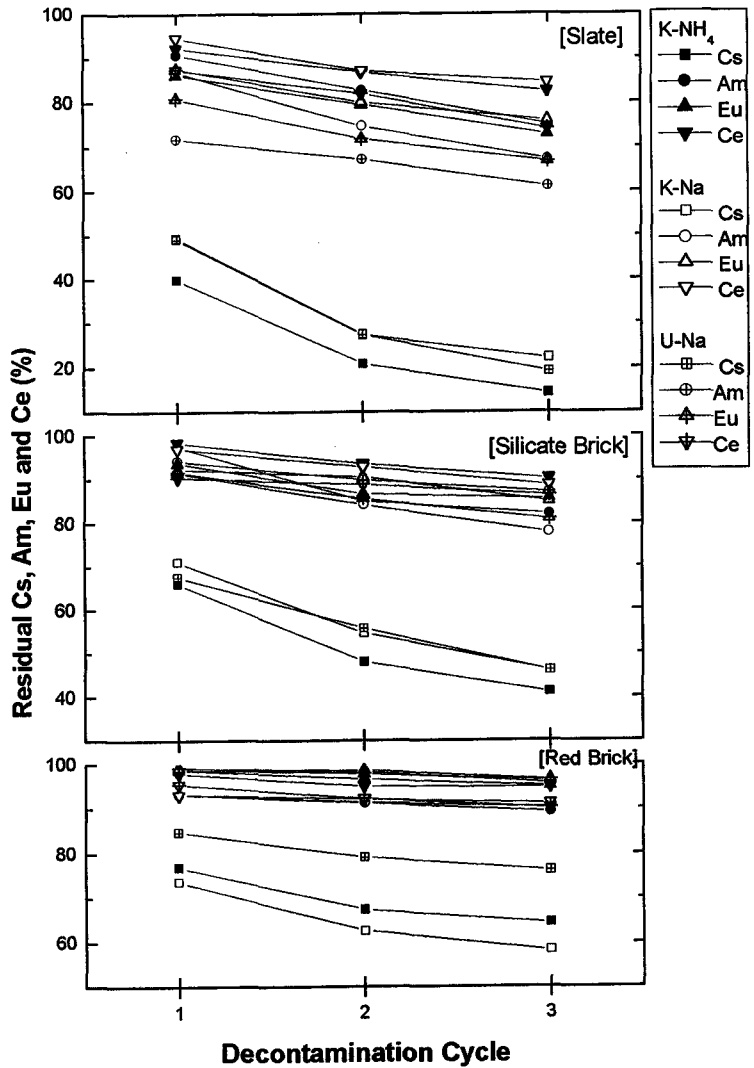
사성 용액으로 3종의 도시 표면 재료(실리케이트 벽돌, 붉은 벽돌 및 슬레이트)를 오염시켜 시편을 제조하였다.

오염 시편의 핵종별 오염 농도를 <표>에 나타내었다. 주요 핵종은 Cs-134, Cs-137, Am-241, Eu-154, Eu-155 및 Ce-144 이며, 이 중 88%가 세슘으로 구성되어 있다.

제염 실험은 각각의 시편에 대해 제염제를 3회 도포 제염하여 적용 횟수별/ 핵종별 제염 특성을 살펴 보았다.

적용 횟수에 따른 핵종별 제염효과를 초기 오염 농도에 대한 제염 후 농도비로 나타낸 <그림 3>을 보면, 개발된 제염제(K-NH<sub>4</sub>)의 제염 효과가 크며 적용 횟수에 따라 제염 효과는 서서히 감소하는 경향을 보이고 있다.

개발된 제염제에 의해 세슘은 3회의 적용으로 슬레이트는 86%,



<그림 3> 제염 횟수에 따른 핵종별 잔존율

실리케이트 벽돌은 59% 및 붉은 벽돌은 35%가 제거되었다. 미량 핵종

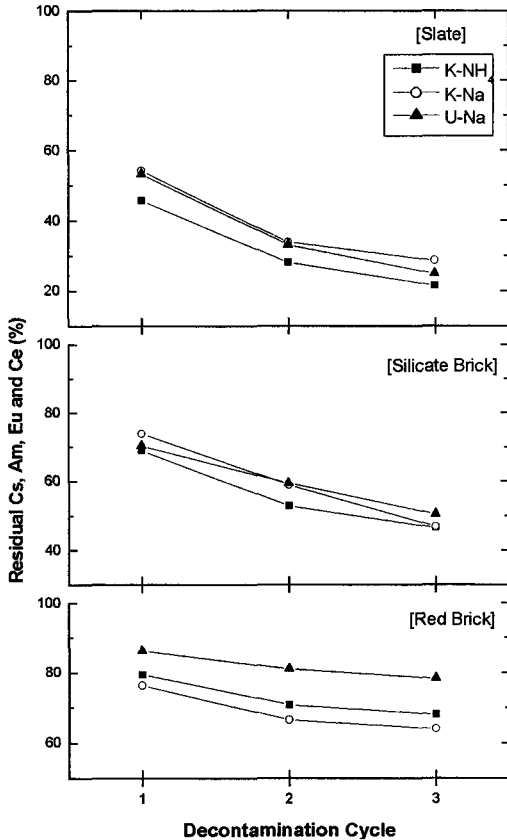
(Am, Eu 및 Ce)은 제염 효과가 낮았다.

<표> 오염 시편의 초기 방사능 농도

Nuclides	Activity (Bq/d)		
	Slate	Silicate Brick	Red Brick
Am-241	10.4	11.5	11.5
Eu-155	19.7	20.0	20.1
Eu-154	28.9	27.2	27.8
Ce-144	51.5	49.2	50.8
Cs-134	42.6	42.2	42.2
Cs-137	803.2	783.7	793.3
Rh-106	6.4	4.7	3.8
Total	962.8	938.5	953.5

이러한 이유는 세슘이 다른 핵종들보다 이온 교환에 의해 쉽게 제거될 수 있음을 나타내며, Am, Eu 및 Ce의 미량 핵종은 실험 조건(제염제의 pH는 9 이상)에서 불용성의 수화물 형태로 존재함으로써 이온 교환에 의한 제거가 어렵다고 판단된다.

총괄 핵종에 대한 제염 효과를 보면(그림 4), 제염 효과가 가장 큰 제염제는 암모늄 이온이 치환된 제



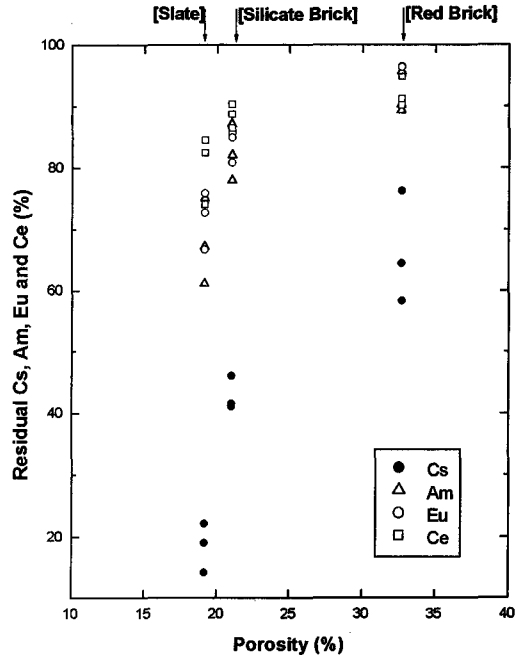
〈그림 4〉 제염 횟수에 따른 총괄 방사능 잔존율

염제로서 3회 적용시켰을때 슬레이트 78%, 실리케이트 벽돌은 52% 및 붉은 벽돌은 33%의 제거 효과를 나타내었다.

이러한 제염 특성들을 대상 오염 시편의 표면 특성의 하나인 기공도에 대해서 비교해 보면(그림 5), 제염 효과는 시편의 기공도가 작을수록 세슘에 대한 제염 효과는 크게 증가하지만 미량 핵종들은 세슘이

는 도포된 제염제에서 유리된 용액이 모세관 현상에 의해 시편 내부의 기공을 따라 들어가 기공 표면에 흡착된 방사성 핵종을 수화, 이온 교환 및 역확산이 일어나도록 하여 제염을 진행시키므로 기공도가 커질수록 이온 교환에 의한 제염 효과가 낮아지게 된다.

따라서 치밀한 표면 구조에 오염된 것의 제염 효과가 보다 크다.



〈그림 5〉 오염 시편의 기공도에 따른 핵종별 잔존율

은보다는 영형을 적게 받음을 알 수 있다.

이러한 이유는 이러한 이유로 은보다는 영형을 적게 받음을 알 수 있다. 이러한 이유는 이러한 이유로 은보다는 영형을 적게 받음을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 제염 효과는 Cs-137 (반감기가 30.1년) 제거를 기준으로 할 때 자연 방치시 슬레이트는 약 60년 후의 농도 및 실리케이트 벽돌은 약 30년 후의 농도를 나타내므로 환경 복구 기간을 단축시키는 데 큰 역할을 할 것으로 기대된다.

그리고 본 제염제는 대단위 지역의 환경 복원에 대한 대비 기술로서 뿐만 아니라 국부적인 오염원 제거에도 폭 넓게 활용될 수 있을 것이다.