

대규모 지역에 대한 방사성 분진 오염확산 억제 기술

원희준 · 문제권 · 정종헌

한국원자력연구원 제염해체기술개발 센터

Dust Suppression Technology of Radioactively Contaminated Area

Hui-Jun Won, Jei-Kwon Moon and Chong-Hun, Jung

Decommissioning Technology Development Center, Korea Atomic Energy Research Institute 1045,
Daedeokdaero, Yu-Seong, Daejeon, Korea

1. 서 론

1986년 4월에 발생하였던 체르노빌 원자력발전소의 핵사고 결과 5000만 Ci로 추정되는 방사능이 분진 형태로 주변지역으로 퍼져 나갔는데, 이 중 50% 정도가 발전소 인근 30 km 지역을 오염시켰고, 나머지는 30 km 외각 및 유럽지역을 오염 시켰다^{1,2)}. 이는, 방사선 방어, 대중에 대한 정보 전달, 식료품의 국제 교역, 국제 정치관계와 같은 실제적이고도 조정해야 할 사항에 대해 많은 문제점을 남겼다³⁾.

체르노빌 핵사고가 발생하기 전에는 방사능 오염의 결과들을 감소하기 위한 조치가 단지 상대적으로 작은 규모의 방사능 누출과 소규모 지역에 적용하기 위한 것으로 대부분의 사람들이 생각하고 있었다. 대단위 지역에 넓게 퍼진 방사능 오염의 경우에 적용시키기 위한 실제적인 관련 사항들에 대해서는 거의 관심을 기울이지 않았다.

핵사고 발생 직후 구 소련에서는 방사능이 계속 확산되어 나가는 것을 억제하고, 제염 복구(decontamination and restoration) 효율의 증대 및 복구 작업자의 방사능 피폭 저감을 위해 오염 지역에 대한 고정화(fixation)를 대규모로 수행하였다. 작업에 동원된 장비는 주로 헬리콥터와 트럭이었는데 이 작업의 결과 20 mR/hr 이상 오염되어있는 토양의 경우 7~10배 정도 방사선 준위를 낮추었고 10 mR/hr로 오염된 지역의 경우 2~4배의 방사능 저감 효과를 얻을 수 있었다⁴⁾. 토양층에서 비교적 좋은 결과를 얻은 것과는 달리 일반 공업용 부지나 고체 표면의 경우 큰 시행착오가 있었으며 화합물의 종류에 따라 효율성

에 차이가 있었다.

미국의 경우 1948년 이후 계속되어 온 핵실험 및 재처리 시설 가동 결과 일부 지역(Los Alamos 연구소, Nevada 핵실험 장소)이 오염되었다. 이들 지역의 제염복구를 위해 많은 노력을 기울였으며 그 결과 제염을 효과적으로 수행하기 위한 오염확산 억제기술(오염물의 고정화)에 많은 경험을 축적하게 되었다⁵⁾. 특히 Nevada 핵실험 장소의 경우 토양 제염, 건물 제염 및 해체에 11년 이상의 기간이 소요되었으며 토양의 제염결과 막대한 양의 방사성폐기물이 발생되었기 때문에 이들 양을 감소시키기 위해서는 작업 초기에 ALARA(As Low As Reasonably Acceptable) 개념에 입각하여 정회기준을 설정할 필요성을 인식하게 되었다⁶⁾.

핵 사고가 발생한 체르노빌 원자력발전소는 서방 세계의 원자력발전소에 비해 안전성에 있어서 확실히 떨어진다. 그러므로 체르노빌 원전과 같은 대형 핵사고가 발생될 가능성이 거의 없다. 그러나, 인구 밀도가 높고 국도가 협소한 국내 실정을 감안할 때 소 규모의 사고가 발생할지라도 환경과 인체에 미치는 영향이 매우 클 것으로 판단된다. 이에 대비한 기술개발 노력이 필요하다.

본 고에서는 구 소련과 미국의 방사능 오염사고를 중심으로 오염확산 억제제에 대한 개념과 대규모 오염확산 억제 경험을 소개하고자 한다. 체르노빌 원전 핵사고의 제염복구 자료중 대단위 지역 오염 확산 방지를 위해 구 소련의 연구소에서 수행한 오염분진 부유억제법(dust suppression)에 관한 내용을 중심으로 서술하였다.

2. 오염확산 억제 개요 및 요구 사항

오염확산 억제기술은 오염분진의 재 부유(resuspension)나 이동을 막기 위해 고정화(fixation) 혹은 고립(isolation) 시키는 것을 의미한다. 이 중에서도 “고정화”라는 용어는 표면에 존재하는 방사성 입자들을 일종의 화합물을 사용하여 표면과 접착시키는 것으로 고정화를 통해 바람이나 비, 기온 변화와 같은 물리적인 충격에 의한 입자들의 재 부유를 막을 수 있다.

그림 1은 고분자로 처리된 모래의 내 풍성을 측정하는 장치에 대한 것이다. 시료 하단에 받침대를 설치함에 의해 풍속을 조절할 수 있도록 하였다.

그림 2는 고정화제로 처리한 시료와 고정화제를 처리하지 않은 시료에 대해 내 풍성을 비교한 것이다. 풍속이 10 m/sec에 도달할 때까지 무게 손실이 없는 경향을 보여준다.

고정화는 다음의 두 가지 이유로 핵사고 오염지역을 제염 복구 하는데 중요하다. 첫째, 고정화로 인해 음식물의 섭취나 호흡에 의해 인체에 흡수되어 건강에 치명적인 악영향을 미치는 요오드나 플루토늄 같은 방사성 핵종들의 재 부유를 크게 삭감시킨다. 둘째, 이미 제염된 지역이나 청정지역으로 오염이 확산되는 것을 감소시킬 수 있다. 오염분진의 재 부유 외에도 고정화를 시킴에 의해 제염효율이 크게 증대된다.

고정화제로 사용되는 화합물의 종류는 다양하다. 그러나, 고정화제를 선정하는 데에는 다음의 사항들이 고려되어야 한다⁵⁾.

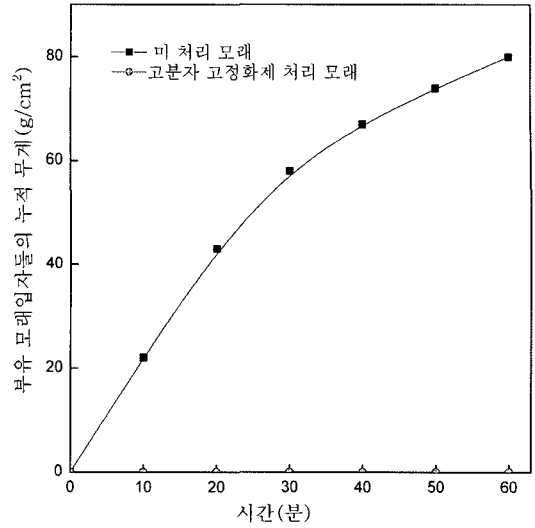


Fig. 2. Comparison of wind stability (wind speed: 10 m/sec)

- 고정화제의 물리적 특성
- 처리되어지는 표면의 물리적 성질
- 고정화제 적용 시 소요 비용

2.1. 고정화제의 물리적 특성

고정화제의 물리적 특성으로서, 재 부유를 억제(dust suppression)하는 원리는 세 가지가 있다. 첫째, 고정화제의 친수성(hydrophilicity)을 이용하는 것이다. 이에 해당하는 화합물로서 염화칼륨이나 염화마그네슘이 있다. 이들은 공기로부터 수분을 흡수하여 습한 상태를 유지시킨다. 오염물질 표면에는 액체의 막이 형성되며 먼지가 많은 도양에 물을 살포하였을 때와

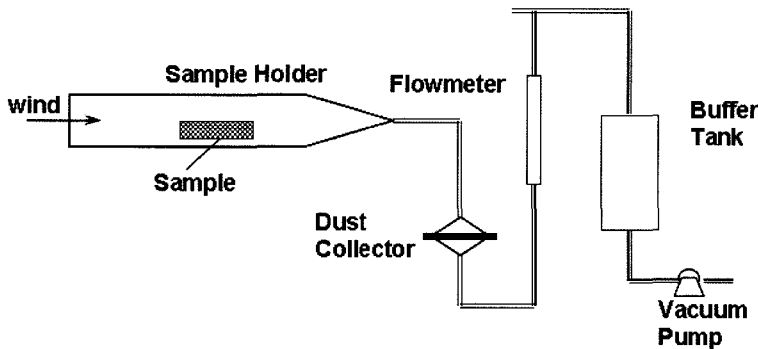


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus to investigate the wind stability of sand layer treated with a dust suppressor solution.

동일한 작용을 한다. 아주 건조한 지역에 적용시킬 경우에는 주기적으로 물을 뿌리는 것이 필요하다. 이들 화합물은 액체 상태나 펠렛 형태로 상용화되어 있으며, 네바다 핵 실험장에서 사용되었던 경험이 있다. 둘째, 고정화제가 토양에 흡수된 후 이들 토양을 서로 결합시키는 성질을 이용하는 것이다. 이에 해당하는 물질로서 석유생성물의 일종인 road oil류가 있는 네바다 핵 실험장에서 성공적으로 사용되었고 오랜 기간 동안 점성을 유지하였다. 그러나 이들은 아주 저분자하며 대단위 지역에 적용시킬 경우 환경에 손상을 미칠 위험이 있다. 셋째, 고정화제가 토양표면에서 막을 형성하는 성질을 이용하여 고정화시키는 것이다. 이에 해당하는 물질로서 아스팔트가 있다. 특히 에멀션시킨 아스팔트는 가열시킬 필요가 없고 취급이 용이하다. 그러나 단점으로서 토양 밑으로 침투하는 효과가 떨어지며 자동차가 고정화시킨 지역을 통과함에 의해 부풀어 오른다. 고정화제 중 일부는 인체나 동물에 독성이 있으며 만약 이들의 물에 용해되면 비에 의해 청정지역으로 흘러 들어가게 된다⁶⁾.

2.2. 처리되어지는 표면의 물리적 성질

처리되어지는 표면의 물리적 성질에 영향을 미치는 주요 인자는 기후이다. 친수성 고정화제는 대기로부터 습기나 물을 흡수할 수 있지만 건조한 지역에서는 말라서 고정화 능력이 저하된다. 다른 기후 조건으로서 비에 의해 독성을 함유한 고정화제가 용해되어 생태계에 위협한 영향을 미칠 수 있다. 또한, 기름성분을 기초로 하는 고정화제는 물에 부유되어 적용을 힘들게 할 수도 있다. 차량이 왕래하는 도로에는 고정화제를 선택하여 적용하여야 한다. 예를 들면 디젤유나 road oil은 차량의 바퀴에 묻은 후 차가 이동함에 따라 오염물을 다른 지역으로 퍼지게 하는 원인이 될 수 있다. 고정화제를 어떤 물질로 사용하느냐에 따라서 그 후 표면에 수행되는 작업을 능력 및 비용에 차이가 생기게 된다. 즉, 처리된 구역을 궁극적으로 청정하게 만들어야 할 경우인데 건물 내부 벽을 고분자 물질을 사용할 경우에 비해 road oil을 사용하면 비용이 적게 소요된다. 그러나, 만약 벽들이 청정하게 되면 고분자 도료가 road oil에 비해 쉽게 벽면으로부터 제거될 수 있기 때문에 고분자 도료를 사용하는 것이 바람직하다.

이웃하는 표면이 고정화제의 선정에 영향을 미칠

수 있기 때문에 처리될 표면에 적용시킬 수 있는 고정화제를 엄격히 결정하는 것이 항상 좋은 것만은 아니다. 예를 들면 road oil은 잔디에 적용시키기에 유리하지만 주위에 있는 건물을 청정하게 제염하기를 원한다면 다른 고정화제를 사용하여야 한다.

고정화제들은 환경에 대하여 독성을 가질 수 있기 때문에, 환경에 미치는 영향과 고정화제를 적용함에 의한 이득을 비교하여야 한다. 어떤 상황에서는 독성이 유리한 경우도 있다. 만약 고정화제로 처리한 토양을 제거하여야 한다면 식물류는 독성이 있는 고정화제를 사용함에 의하여 토양의 제거 전 식물류를 제거하는 공정이 생략되기 때문이다⁷⁾.

2.3. 고정화제 적용 시 소요비용

고정화시키기 위해 소요되는 경비의 주요인자는 세 가지가 있다.

- 고정화제의 가격
- 핵사고 발생지역에 고정화제 수송 비용
- 고정화제를 표면에 적용시키기 위한 비용

고정화제의 가격은 불순물이 함유된 정도에 따라 차이가 있으며 무게, 부피 기준으로 판매된다. 대량으로 판매되기 때문에 이들의 무게나 부피사이의 환산인자를 정확하게 파악하고 있어야 한다. 묵히기 전의 고농도를 기준으로 가격이 정해져 있기 때문에 전체 소요되는 양을 바르게 산정하고 있어야 한다. 대부분의 고정화제는 물에 의해 용해되는데 일반적으로 물을 많이 첨가함으로써 고정화제가 오염표면 아래로 투과하는 능력이 증가되고 그 결과 고정화제의 성능을 향상시킨다. 1983년 미국시장 기준으로 상용화 된 road oil, 에멀션된 아스팔트의 가격은 톤당 130~210\$이며 1 m²를 처리하는데 0.1~0.4\$가 소요된다⁵⁾. 그러나 이들은 자체가 오염물이므로 적용한 후 청정화 시키기가 매우 어렵다.

핵사고 지역에 고정화제를 운반하는데 소요되는 비용은 외국에서 수입하여 적용시킨다면 고정화제가 F.O.B 가격으로 매매되기 때문에 항공료와 공항에서 차편으로 핵사고 현장까지 운반하는 운송료가 될 것이다. 그러나, 국내에서 생산된 고정화제를 사용하면 운반비용을 크게 절감할 수 있다. 고정화제를 표면에 적용하는 데에 소요되는 비용은 적용방법, 적용되어지는 표면의 성질, 적용횟수에 따라 차이가 생길

것이다.

토양에 고정화제를 적용시키는 방법은 분사기와 펌프를 장착한 물탱크를 가지고 있는 트럭이나 항공기를 사용하는 것이다. 물을 이용하여 씨앗을 뿌리는 장비(hydroseeder)를 이용할 수도 있다. 벽, 마루, 지붕을 고정화하기 위해서는 일반적으로 페인트 분사기를 사용한다.

표면의 형태도 적용하는 방법을 결정하는 데에 중요한 역할을 하며 표면조건도 적용비용에 영향을 미친다. 예를 들면, 토양의 굴곡이 심하거나 이들이 식물류로 덮여있다면 평평하고 비어있을 때에 비하여 많은 비용이 소요될 것이다. 먼지가 많이 발생하는 지역의 고정화를 경제적으로 적용하기 위해서는 고정화전에 물로 적시고 고정화 후 이를 물러서 사용하여 다져주어야 한다.

3. 체르노빌 원전 핵사고 오염지역의 방사능 고정화

체르노빌 원전 핵사고 지역은 Byelorussian-Ukraine wood land로 부르는데 이중 반은 농토이고 나머지는 숲으로 되어있다. 토양은 sandy soil로 이루어져 있으며 방사능 낙진은 바람이나 비에 의해 쉽게 부유되어 2차 오염의 원인이 되었다¹⁾.

토양에 대한 방사능 분석결과 전체 방사능량의 60%가 채취 토양 중 상단 5 cm 이내에 존재하는 것으로 나타났다⁴⁾. 또한, 전체 방사능의 95% 이상이 분출된 핵연료와 핵연료의 입자들로서 크기는 3~750 μm 이었다¹⁾. 핵사고 초기에 대기 중 방사성 오염분진은 에어로졸 형태의 미세 파편으로서 이들이 대기를 오염시키는데 결정적 역할을 하였고 방사성 핵종을 다른 지역으로 이동시켰다.

체르노빌 핵사고 당시 오염분진을 고정화하기 위한 몇 가지 시도가 있었다. 기술적인 어려움은 적용된 화합물을 다시 사용할 것인지에 대한 타당성을 가늠할 수 있는 것으로서 고준위로 오염된 지역에 존재하는 오염물을 오랫동안 효과적으로 고정화시키는 것뿐만 아니라 사용된 설비가 넓은 지역에도 잘 적용할 수 있는지에 대한 설정한계가 모호하였다. 또한, 오염된 지역의 토양을 제거하고 이들을 처분하는 것은 너무나 광범위한 지역이 오염되었기 때문에 완전하게 이루어지지 않았다.

Table 1. Radioactivity of contaminated sand.

Nuclides	Radioactivity (Bq)			
	lignin	lignosulfonate	PVA	PVA-PMAA
²⁴¹ Am	125.4	126.8	130.2	124.7
¹⁵⁴ Eu	326.5	316.0	331.1	324.9
¹⁵⁵ Eu	204.7	199.0	201.7	199.4
¹⁴⁴ Ce	484.2	498.4	506.3	482.9
¹²⁵ Sb	26.6	40.1	24.8	38.0
¹³⁴ Cs	412.3	408.9	413.2	410.7
¹³⁷ Cs	7520.9	7473.6	7561.2	7382.7
¹⁰⁶ Rh	56.9	62.1	73.8	47.1
Total	9157.5	9124.9	9242.3	9010.4

방사능 낙진 0.05 g을 고농도 질산용액 500 ml에 용해시켰다. 이 용액 2 ml를 사용하여 모래 10 g을 오염시키고 각각 고정화제를 처리한 후 측정된 방사능 양을 표 1에 수록하였다. 핵사고가 발생한지 7년이 경과한 후 주요 방사성 핵종은 Cs이며, 핵사고 초기의 주요 방사성 핵종이었던 I는 거의 검출되지 않는다.

핵 사고에 오염된 지역에 대한 제염복구 작업이 거의 완료된 1988년 이후 과학자들이 2년 간격으로 체르노빌에 모여 작업 전반에 관한 평가회를 가졌다. 평가회에 보고되었던 자료들 중에서 대단위 지역 오염 확산 억제에 관한 부분을 아래에 정리하였다.

3.1. 고정화제의 이론적 배경

토양입자 내 모래성분은 정사면체의 $\text{Si}(\text{O}/2)_4$ 가 연결되어 있는 거대한 분자의 모임으로 이루어져 있으며, 표면에 silanol 이나 siloxane group이 존재한다고 알려져 있다⁸⁾. Siloxane 자체는 음이온이고, silanol group은 물에 해리되어 음전화를 띠게 된다^{9,10)}.

그러므로 이들은 양이온을 형성할 수 있는 고분자 물질과 수용액 내에서 정전기적 인력에 의해 결합할 수 있으며 그 결과 토양 표면에 존재하는 오염분진을 고정화하게 된다. 이러한 고정화제를 개발하기 위한 연구는 수용액 내에서 이온을 형성할 수 있는 고분자 물질을 선정하여 이들에 대한 물리, 화학적 특성을 파악하고 토양에 적용시킨 후 고정화제의 방사능에 의한 분해 정도, 토양과 고정화제의 접촉에 관한 미세구조 관찰, 환경에 미치는 영향 및 보다 저렴한 고정화제를 사용하기 위한 타당성 조사의 방향으로 진행되고 있다.

Polyelectrolyte complex(PEC)류는 방사능의 고정화에 적절한 성질을 가지고 있다. 이들은 polyanion과 polycation이 coulombic force에 의해 결합되어진 형태이며 결합에 의해 각 polyelectrolyte에 존재하고 있던 반대 이온이 정량적으로 떨어져 나온다. PEC는 strong polyacid-strong polybase, strong polyacid-weak polybase, weak polyacid-strong polybase, weak polyacid-weak polybase의 네 그룹으로 분류된다. 일반적으로 PEC의 성질은 이를 구성하고 있는 각 성분에 의해 결정된다. 예를 들면, strong polyacid와 strong polybase로 이루어진 PEC의 경우에는 해리 정도에 따라 몇 가지 조성을 가질 수 있다¹¹⁾. PEC의 형성은 각 polyelectrolyte내 이온의 위치나 성질, 용매, 이온강도, 산도, 온도등과 같은 각 성분의 특성과 화학적인 주위환경에 의해 결정되어지는데 용액 내에서 액체나 고체상태 혹은 겔 상태로 존재한다. 주요 관련 인자가 강력한 coulombic force이고 혼합후의 남아있는 순수 전하가 단지 이들의 조성에 따라 쉽게 변할 수 있기 때문에 PEC를 현장에 적용하기 위해서는 보다 많은 물리화학적 특성에 대한 데이터가 요구된다¹²⁾.

Strong polyacid와 strong polybase로 이루어진 PEC들은 보통의 유기용매나 무기용매에 비 용해성이 다. 이들은 예를 들면 물/아세트/NaBr, 물/아세트/황산, 물/에탄올/염수생산, 물/dioxane/CaCl₂와 같이 몇 가지 화합물로 된 용매에 녹는다. Michales 등^{12,13)}은 NaSS{poly(sodium styrenesulfonate)}와 PVBMA{poly(4-vinylbenzyl trimethyl ammonium chloride)}의 물리화학적 성질을 보고하였다. 이 PEC는 상기된 혼합용매에 의해 용해되었으며 균일한 용액을 캐스팅함에 의해 얻어졌는데 투명하였고 무정형이었다. 건조된 PEC가 딱딱한 물질인 반면 건조되기 전의 상태는 고무의 성질을 가지고 있었다. 이 PEC의 물을 투과시키는 능력은 각 성분의 비율에 따라 조절되어질 수 있으며 셀로판에 비해 물의 투과도가 10배 이상 우수하다. Michales 등이 연구한 것과 유사한 계에 대하여 Simolen 등¹⁴⁾은 물의 투과도가 높은 형상을 막내에서 물이 가지는 구조의 특성으로 설명하였다. 본 계는 다른 합성 고분자에 비하여 산소의 투과도도 높은 것으로 나타났다. 이러한 현상은 PEC가 음이온과 양이온 site가 존재하는 이온성의 그물형 구조를 가지는 것을 의미한다.

PAA{poly(acrylic acid)}와 PEPP(polyethylenepiperazine)이 동일비율로 존재하는 weak polyacid와 weak polybase를 기초로 하는 PEC 막 역시 물과 산소를 잘 투과시키는 것으로 보고되고 있다¹⁵⁾.

위에 언급된 것처럼 PEC는 물이나 산소를 잘 통과시키는 특징이 있으며 자체 내에 이온성 site를 많이 가지고 있다. 또한 PEC내 polyanion이나 polycation의 함량을 변화시킴에 의해 투과성을 증대시키거나 감소시킬 수 있다.

오염확산 억제의 대책으로서 오염된 토양에 식물류를 경작하는 것이 효과적이라고 알려져 있다. 그러나 이 방법은 시간을 필요로 한다. 따라서 PEC를 오염분진의 부유를 막기 위한 고정화제로 적용시킨 후 식물을 경작할 경우 물이나 산소를 잘 투과시키는 막 자체의 특성 때문에 식물의 성장에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 생각된다. 또한 모래성분을 많이 함유한 토양에 PEC를 고정화제로 적용시킨다면 보다 효과적으로 오염 확산을 억제시킬 수 있을 것이다.

3.2. 체르노빌 원전 오염지역의 방사능 고정화 평가

IGP(Institute for Problems of Geophysics)의 연구결과에 의하면 풍속이 4 m/sec를 초과하면 바람에 의해 분진에 공중으로 흩날리게 되어 공기 오염도를 크게 상승시키는 것으로 나타났다. 그래서 화합물을 사용하여 오염물을 고정화시키는 것이 핵사고 직후 수행하여야 할 주요 과제이었다. 오염확산의 억제를 위해 사용된 고정화제는 다음과 같다¹⁶⁾.

3.2.1. Polyvinylalcohol(PVA)과 glycerine

1986년 5월 고정화 작업 중 사용된 고정화제로서 α -방사능으로 오염된 지역에 이미 사용된 물질이다. 본 물질은 체르노빌시에서 매일 200 ton 씩 제조되었으며 소방차로 체르노빌 발전소 인근 및 타 지역으로 운반되어 졌다.

지면 1 m² 당 0.5~1 L의 소비율로 심하게 오염된 지역(500 mR/hr~50 R/hr)의 350ha를 처리하였는데 PVA를 기초로 한 고정화제는 대기중 오염분진의 양을 감소시켰고 이들의 이동을 억제하였지만 그 효능은 1~2 개월 정도만 유지되었다.

3.2.2. Lignosulfonate

1986년 6월 IPOOC 연구소의 추천에 따라 ligno-

sulfonate를 발전소 지역에 1 ha당 10 ton의 비율로 적용시켰다. 본 화합물의 특징은 저렴하고, 적용이 쉽고, 많은 양을 확보(1년에 180만ton)할 수 있다는 것이었다. 그러나 단점으로서 독성이 크다는 것이었다. 이 화합물을 해사고 발생지역에 적용시킨 결과 물에 대한 용해도가 아주 크므로 형성된 막이 비에 의해 씻겨 나가는 문제가 발생하였다. Lignosulfonate에 염화칼슘을 첨가하여 그 효능을 다소 증대시킬 수 있었다.

3.2.3. MM-1

토양 내 최적 고정화를 위해서 광학현미경을 사용한 고분자 화합물-토양의 보호층에 대한 미세구조(microstructure)가 연구되었다¹⁷⁾. 그 결과 안정화된 고분자-토양층에 대해 다음의 결합형태가 존재함을 보고하였다.

- 고분자막내에 모래입자들이 파묻혀 있는 형태, 이 경우 각 모래입자는 크기에 관계없이 고분자막(두께, 3~10 μm)내에 존재하고 있으며 입자들 사이의 공간에는 고분자가 채워져 있다.

- 모래입자들은 단지 접촉된 위치에서만 고분자와 붙어있다. 모래입자들 사이의 공간을 통해 물이 통할 수 있으며 하층의 모래도 공기와 접촉할 수 있다.

- 서로 다른 크기의 모래 입자들 사이에 상당한 거리를 두고 길고(수 μm ~2 mm) 얇은(20 μm) fiber bridge를 가지고 있다. 이들 가교는 고정화를 더욱 단단히 한다.

- 작은 입자들(직경, 5~250 μm)이 큰 모래 입자들(20 μm 이상)에 붙어있는 형태, 이 경우 작은 분산질 입자들은 고분자 용액에 의해 잡혀져서 큰 입자들에게 끌려간 후 입자의 표면에 정착하게 된다.

1986년 6월 상기의 성질을 가지는 모스크바 대학에서 개발한 MM-1을 사용하는 방안이 고려되었다.

MM-1은 hydrolyzed polyacrylonitril(GIPAN), polydimethyl diallyl ammonium chloride(VPK-402), potassium nitrate 및 water의 혼합물이다.

본 혼합물의 소비율은 시간당 10 ton이며, PEC로 분류된다. 물과 작용하여 비 용해성 interpolymeric complex를 형성하여 지면과 고분자 사이에 딱딱한 3~5 mm 두께의 층과 함께 micropore가 존재하게 된다. 이 딱딱한 층은 건조한 상태와 습한 상태가 몇 번 반복되거나, 얼었다가 녹게 되는 상태가 거듭되었

음에도 불구하고 그 효능을 유지하였다. 또한, 공기나 물을 잘 통하게 하면서도 표면증발을 억제하기 때문에 식물의 성장조건을 만족시켰다. MM-1에 의해 표면 처리된 지역의 1986년 8월 대기중 오염도는 처리되기 전에 비해 30~125배의 방사능량 감소율을 보여주었다. MM-1 혼합물에 의해 표면 처리된 지역에 대한 장기간의 관찰결과 표면과 고분자 막은 -30과 30°C의 계절적인 차이뿐만 아니라 환경적인 인자의 영향을 거의 받지 않았으며 1987년 4월까지 성능을 유지하고 있었다.

3.2.4. Siliconate

우크라이나의 Institute of Polymer Chemistry 에서는 콘크리트면의 혐수성(hydrophobicity)을 증대시키기 위해 자체 개발한 고정화제를 제시하였는데 그 성분은 methylsodium silicate 혹은 ethylsodium silicate, cupric sulfate, ethyl alcohol 및 water이다. 이 혼합물의 여름철 건조 조건은 건조한 공기에 1~1.5시간, 습한 공기에 3~4시간, 비가 올 때 24 시간이다.

3.2.5. Latex¹⁸⁾

Butadiene-styrene latex를 고정화제로 사용하였다. 분진 부유억제의 화학적인 방법은 오염된 표면에 물이나 바람에 의한 침식을 억제시키는 보호막을 형성시키는 것이다. 화학적, 생물학적 방법은 물이나 바람의 침식으로부터 씨앗과 초목류를 보호하기 위해 latex막과 잔디층을 표면에 적용시키는 것이다. 지난 5년간의 실험 결과 이들의 효능에 대하여 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

- Latex coating은 오랜기간 동안 효과가 유지되며 탄성도와 인장강도가 크므로 5년이상 비에 의한 침식능을 유지할 수 있다.

- 기질(substrate)과의 상호작용 결과 내수성의 macrostructure가 유지되며 물에 난용성이다.

- 온도 변화에 민감하지 않다(계절적 인자, 낮과 밤 사이의 기온차).

- 이차오염(secondary contamination)을 발생시키지 않으며 기질의 여과성질을 유지시킨다.

- 비독성이다.

- 식물의 성장초기에 요구되는 수력학적 조건을 만족시키며 수분함량의 증가에 기인하여 식물의 성

장을 촉진시킨다. 특히 latex 층에 대한 성장 정도, 적절한 초목류의 선정 및 경작도에 대한 연구결과, latex막은 내수성막은 다공성이고, 처리된 토양 상부 1~2 mm의 층은 수분을 함유하거나 여과시키는 좋은 조건을 유지시킴으로써 토양 내 식물의 성장에 대한 좋은 조건을 유지시켜 주었다. 또한, 토양과 대기사이의 공기접촉 및 기체들의 교환에 의해 잔디의 형성을 촉진시켜 줄 뿐만 아니라 농작물의 재배 면적을 넓게 하여준다. 이 방법과 기존의 방법과의 차이는 비료층의 적용을 위해 소요되는 작업을 배제한다는 것이다. 실제로 핵사고 후 지난 5년간의 실험결과 식물의 경작도가 기존의 방법에 의해 비료층을 적용하여 식물을 다시 경작할 때의 결과와 거의 동일한 것으로 나타났다.

1986년 6월부터 한 달 동안 기름 저장고 지역에서 수행되어진 제염 작업 시 latex로 표면을 처리함으로써 대기 중 방사능 함량을 10~15배 감소시켰으며 체르노빌 발전소 4호기 주위에 대한 고정화 결과 공기 중 방사성 함량은 100배 정도 감소되었다. 1987년 5월부터 10월까지 발전소 인근 5 km 지역 내 대기 중 월간 평균 방사능은 고정화된 지역의 증가에 따라 괄목할 정도로 감소되었다. 1441 ha의 토양을 고정화시키는데 소모된 latex의 양은 2941 ton 이었다.

1987년 11~12월 사이에 고정화시킨 지역들에 대해 1988년 봄, 눈이 완전히 녹은 후의 상태를 평가한 결과는 latex막이 내 침식성 특징을 유지하는 것으로 나타났다. 제염처리 되지 않았던 고정화 지역들은 막이 파괴되지 않았기 때문에 재차 고정화할 필요가 없었다. 고정화 후 6개월이 경과한 지역들에는 잡초들에 의한 자동적인 씨뿌림 뿐만 아니라 보호막의 보습성에 기인하여 잔디와 초목류가 자라고 있었다.

붉은 숲(red forest)이라고 불리는 50 ha의 제염지역에 대해 생화학적인 방법으로 오염분진을 고정화시켰다. 여러 종류의 초목류 씨앗들이 뿌려졌다. 처리된 씨앗은 rye grass(독보리속의 목초), timothy grass(큰 조아재비 목초), 클로바, lupin(식용콩), alfalfa(자주개자리)이며 자작나무나 소나무류는 복합 무기물 비료와 함께 처리되었다. 이 지역들은 씨를 뿌린 후 3~5%, 1.5 L/m² 비율로 처리하였다. Latex가 초목류에 대해 악영향이 없었으므로 필요 latex

화합물은 초목류를 심은후에 적용되었다. latex막으로 처리된 지역과 처리되지 아니한 지역을 비교해본 결과 처리된 지역에서도 계속하여 다년생 초목류가 성장하고 있었으며 이 막들은 완전히 보존되어 있었고 더 이상 씨앗을 뿌릴 필요가 없었다. 또한, 다년생 초목류는 토양으로 하여금 바람이나 물에 대한 침식을 강력히 억제하기 때문에 더 이상의 부차적인 처리 방법이 필요하지 않았다. 다년생 초목류는 뿌리 부분으로부터 비료성분이 흘러나가는 것을 방지하도록 한다.

3.2.6. TLS 및 oil slime¹⁹⁾

체르노빌 핵사고 후 제염, 복구 중 오염분진의 부유를 억제하기 위해 효과적인 화학제나 기술들이 제시되었다. 주요 연구과제는 모래성분이 함유된 지역에 대해 효과적이면서도 저렴한 방법으로 대규모 적용이 가능한 생화학적 고정화법을 개발하는 것이었다. 1986년부터 1987년 사이에 대규모로 수행된 조처들은 바람에 의한 분진의 확산도를 크게 감소시켰으며 그 결과 출입금지 구역(발전소로부터 반경 30 km 이내)내 대기 중 방사능을 크게 감소시켰다.

대기를 통한 오염분진의 확산을 억제시키는 작업은 계절적, 혹은 날씨에 따라 그 결과가 변화한다. 특히 강한 바람에 의해 형성된 분진들은 수백 km의 지역까지 이동하게 된다. 바람이 불 때 차량이 이동하는 것은 특히 위험하다. 방사성 핵종들의 대단위 지역으로의 전파 외에도 오염된 지역에서 제염복구 작업을 수행하는 사람들의 체내에 방사능이 누적됨에 따른 피폭의 위험성도 커지게 된다.

주요 오염분진 부유억제 대상지역은 프리피아트시의 도로와 그 인근지역, 출입통제 지역의 고속도로 근처이었다. 체르노빌 원전 근처 도로의 방사성 준위는 수백 $\mu\text{R/hr}$ ~수 R/hr 이었다. 특히, 출입 금지지역 외곽 도로의 오염준위는 수십 R/hr 로 남아있었다. 경작지, 폐기물 매립지, 건축을 위해 쌓아놓은 모래산, 움푹 패인 곳과 같은 노출지역들 역시 대단히 위험하였다. 이 당시 가장 시급한 문제는 가장 빠른 시간 내에 방사능 오염과 관련된 복잡한 문제들을 해결할 수 있는 방법을 찾는 것이었다. 그 중의 하나가 출입 통제지역과 그 외곽지역 내 방사성 핵종들을 고정화시키는 것이었다.

핵사고 발생 전 IPOOC(Institute of Phosicoor-

ganic Chemistry & Carbon Chemistry of the Academy of Sciences of Ukraine)에서는 technical ligno sulfonate(TLS)를 기초로 하는 점액물질, sulfite alcohol malt residues(SAMR)와 sulfite yeast beer (SYB)로 불리는 목재 산업에서 발생하는 고분자 물질에 대한 연구를 수행하였다. 특히, TLS의 강도를 높이기 위하여 filler를 첨가하였다. 그 결과 높은 역학적 강도와 내수성이 생기게 되었다. TLS의 가격이 저렴하다는 특징과 함께 이들은 분진의 재 부유 억제제로 사용되도록 핵사고 즉시 추천되어 졌다.

1986년 5월 중순 정부의 결정에 따라 발전소와 인근지역 내 분진 재부유 억제 작업을 TLS를 사용하여 그해 10월까지 수행되었다. TLS의 화학적인 특징 외에도 과학자들은 국가의 경제적 손실이 없이 대규모로 사용되어질 수 있다는 가능성, 생산하기에 간단한 공정, 일상적인 군사장비나 산업장비에 의해 사용될 수 있는 편리성들을 고려하였다.

TLS의 사용 가능성에 대한 주요 논점은 1 ton 당 30~50 루블로 이 당시 국가 내에 저장되어 있는 많은 양의 TLS(연간 생산량의 50%인 180만 ton)를 얼마나 효과적으로 모으느냐 하는 것이었다.

필요한 기술적인 규정과 제조를 위한 교육이 최단 시간 내에 이루어졌다. TLS는 주로 도로들의 주변 분진들을 억제하고, 이미 죽어버린 숲에 대해 화재가 발생하지 않도록 하며 분진이 있는 모든 노출지역에 대해 사용되었다.

이와 동일한 기간 동안 유화학 연구소(Institute of Oil Chemistry)의 과학자들은 oil slime을 사용하여 분진의 부유를 억제하는 방안을 제시하였다. Oil slime은 기름을 생산하는 동안 발생하는 찌꺼기이다. 우크라이나 지역 내 이들의 저장된 양은 수만 ton 정도가 되었었다. Oil slime은 상업적 생산을 위해서로 다른 정제 공정 중 발생하는 부산물로서 무겁고 수지를 형성하는 기름 성분들의 혼합물이다. 이들은 끈적끈적하고 흡습성이기 때문에 도로표면의 미세한 분진을 응집시키는 데에 적합하였다. 이러한 특징 때문에 정부의 1986년 7월의 결정에 따라 이들은 여름과 가을에 사용되었다. TLS 용액과 oil slime의 소비율은 10 l/m²이다. TLS의 경우 지표에 흡수되어 15~20 mm 두께의 딱딱한 물질을 형성하며 훌륭한 내 침식성을 보유하게 된다. 딱딱한 물질의 안정도는 조성이나 기상학적 인자에 의해 영향을 받는다. TLS

자체만을 사용할 경우 건기에 보호 작용을 장기간 지속하였고 우기에는 염화칼슘을 TLS의 조성에 첨가함으로써 내수성을 향상시킬 수 있었다. TLS에 염화칼슘을 첨가한 혼합물은 중간강도의 비에 3~4회 노출되어도 안정성이 잘 보장되었다. 그러나 오랜 기간 동안 그 기능을 발휘하기 위해서는 이들을 반복 적용시키는 것이 필요하였다.

Oil slime 자체는 딱딱한 물질을 형성하지 않지만 포장도로 주변의 분진을 응집 시킬뿐만 아니라 장비 운반 결과 비 포장 도로에 형성되었던 분진들을 완전히 응집시켰다. 또한 비포장 도로에 형성된 덩어리들은 기계의 아랫부분에 묻지 않았으며 이들을 오염시키지 않았다. oil slime의 장점은 바람에 의해 형성된 2차 오염분진들이 처리된 표면에 응집되는 것이었다.

TLS와 oil slime의 독성은 방사능의 오염준위에 비해 환경에 미치는 영향이 극히 미미하였다. 이 둘 두 물질에 의해 처리된 지역의 표면층은 수분을 함유하고 있었기 때문에 식물류의 성장이 가능하였다. 이들의 사용에 있어서 물리화학적 성질을 고려하여야 한다. 특히, oil slime의 가연성으로 인해 발화점 이하의 온도에서 사용되어야 하며 항공기의 사용을 불가하게 만든다.

1986년 당시 주요 분진 부유 억제제는 TLS와 oil slime이었다. TLS는 75000 ton 이상, oil slime은 5000 ton 이상이 소모되었다. 처리된 전체 지역은 5000 ha 이상이었다. 1986년 9월중 이들로 처리된 지역의 대기 중 방사선 준위는 1986년 5월에 비해 60배 이상 감소되었다.

- 오염된 지역에 대한 방사성 분진들을 고정화 시켰다.
- 도로변으로부터 방사성 핵종들의 부유를 멈추거나 감소시켰다.
- 시골 길가와 비포장 도로의 분진들의 양을 감소시켰다.
- 폐기물 저장 지역들, 모래웅덩이의 노출지역과 그 외 지역들의 바람에 의한 침식에 의해 발생된 오염분진들의 확산을 감소시켰다.
- 죽어버린 숲에 있는 나무들의 잎이나 줄기에 있는 방사성 오염물을 고정화 시켰다.

1987년에는 제염과 분진 부유제 작업이 보다 체계

적이고 규칙적으로 수행되었다. “30 km 지역 내 분진부유 억제에 대한 복합계획(Complex Program of Dust Suppression in the 30 km Zone)”이 1987년 7월 정부의 결정에 의해 확정되었다. 화학적, 생화학 적 방법들의 의해 분진이 많이 존재하는 지역들의 장기 고정화(long term fixation)에 대한 전략이 세워졌다. 그 중에서 주요한 전략 두 가지는 1) 화학적 분진부유 억제제를 사용함에 의해 오염을 고정화 하는 것(자동차 도로와 그 주변, 건물지역, 노촌작업 장소). 2) 다년생 초본을 경작함에 의해 고정화 하는 방법이다. 두 번째 경우 출입금지 구역 내 존재하는 광활한 모래지역(프리피아트 시내 침적된 모래지역으로 그 중 한군데의 면적은 1500 ha)과 제염조치의 결과로 형성된 지역을 의미한다. 1987년 주요 고정화제로 소모된 TLS와 oil slime의 양은 20000 ton으로서 출입금지 구역 내에 5500 ton, 그 외곽지역에는 10000 ton의 TLS와 4000 ton 이상의 oil slime이 소모되었다. 처리된 전체 도로의 길이는 556 km 이었고 도로 주변 78.6km가 화학적, 생화학 적 방법으로 처리되었다. 그 결과 대기 중 오염도는 10~100배가 감소되었고 사람들의 거주 및 작업조건을 향상시켰다. 체르노빌 원전 5 km내 지역의 대기 중 오염도는 10배 이상 감소되었다.

생화학 적 방법에 의해 장기간 오염물을 고정화(예를 들면 잔디를 씌우는 작업)하는 방법은 침적된 모래의 두께가 두껍고 지하수가 지표 바로 아래에서 흐르기 때문에 많은 문제점을 내포하고 있었다.

- 프리피아트시 다섯 번째 원자력발전소 건설 예정 지이며 범람 지역이었던 Urotshistshe에는 모래가 5~7m 두께로 덮여있고, 지하수는 지표로부터 7~9m 깊이에서 흐르고 있었다.
- “붉은 숲” 지역 모래층의 두께는 0.5~3m이고, 지하수는 3~4m 이하에서 흐르고 있었다.

연구 결과에 의하면 모래지역에서 자연적으로 초목류가 성장하는 속도는 아주 느리다. 이 경우 식물에 의해 덮여진 막은 부서지기 쉬우며 모래표면의 바람에 의한 침식을 막기가 아주 어렵다. 모래지역에서 오염분진이 발생하는 것을 막기 위한 가장 빠른 방법은 이들을 다년생 초목류로 씌우는 것이다. 조밀하게 형성된 멧장(sod)은 모래표면을 부서지지 않게 잘 막아주며 그 결과 2차 오염을 방지하여 준다. 그러나,

진흙 입자들을 소량 함유하고 있는 모래지역들은 수분을 보유할 수 있는 능력이 미미하여 여름의 더운 기간 동안 모래의 온도가 상당히 높게 상승하므로 식물의 씨앗이나 뿌리가 충분히 성장할 수 있는 조건을 제공하지 못한다. 이러한 인자들은 우기에 있어서도 씨앗들의 발아를 억제하는데 결정적인 역할을 하는데 비에 의해 식물이 발아하였어도 물은 땅 밑으로 흘러내려가게 되며 모래표면의 온도는 상승된다. 그러므로 모래표면을 15~20 cm의 토양으로 덮은 후 비료를 공급한 후 수차에 걸쳐 물을 뿌려줌으로써 다년생 초목류를 키우는 것이 필요하다. 식물에 의해 사토에 묻어있는 분진을 고정화시키는 기술은 토양의 비옥도를 높임에 의해 모래가 가지고 있는 단점을 보완해 준다. 1986년 7월 중에 도시지역 제염을 위해 많은 양의 물을 소모하였다. 그 후 식물류에 대한 급수가 중단되었는데 생화학적으로 처리된 지역의 식물들은 말라 버렸다. 따라서, 생화학적으로 분진을 고정화시킨 지역에 대해서는 계속적으로 물을 공급하는 것이 필요하다. 그러나 식물류에 의해 분진을 고정화시키는 방법은 체르노빌 원전 5 km의 광대한 지역을 비옥한 흙으로 모래를 덮어야 하기 때문에 작업하는 데 많은 인력이 소모되고 흙이나 식물류(잔디류)를 보관하는 대규모 저장고가 없었기 때문에 운반 장비들의 많이 사용되었다.

1987년에는 오염분진이 많이 존재하는 지역의 고정화를 위해 다음의 방법들이 제시되었다.

첫째, 20~25 cm 두께의 표면 모래층을 TLS를 적용하여 물이 흘러 내려가지 않도록 하는 것이었다. 이를 위해 TLS의 적용전이나 적용직후 처리된 표면을 20~30 μm 의 크기를 가지는 석회분말(lime)을 가지고 0.5~1 ton/hr의 소비율로 덮는 것이었다. 두 화합물이 섞이는 동안 물에 용해되기 어려운 혼합물이 형성된다. 그 후 고정화된 표면은 농기계를 사용하여 15~20 cm 정도로 촘촘하게 만들어서 물이 밑으로 흘러 내려가지 못하도록 한다. 초목류를 심은 후에는 식물의 뿌리가 단단해질 때까지 이 지역의 분진 부유를 막기 위해 4~5 m^3/ha 의 소비율로 다시 TLS로 처리한다. 형성된 딱딱한 물질은 모래의 뿌리지역으로부터 수분이 증발되는 것을 막는 중요한 역할을 한다. 본 방법의 특징은 성장하는 초목류의 뿌리에 물을 충분히 공급하는 것이다.

두 번째 방법은 다년생 초목의 씨앗과 겨울 호밀

을 함께 심는 것이다. 호밀은 통풍이나 통수에 저항력이 크며 극한 조건에서 강력한 경작능력이 있고 일년 혹은 그 이상의 기간 동안 고정화 능력을 잘 지켜줄 수 있는 강력한 뿌리를 가지고 있다. 겨울 호밀은 고온의 나쁜 조건에서 다년생 초목의 발아를 보호하고, 죽은 다음에는 습기를 유지시켜 주는 안정적인 막을 남기고 모래표면에 뗏장의 막을 형성시켜준다. 식물류를 조합하여 심으면 표면에 뗏장이 쉽게 형성되며 다년생 초본의 발아를 위한 유리한 조건을 만들어 준다. 본 기술의 특징은 식물을 심은 후에 위에서 무거운 장비로 누르는 것이다. 그 결과 씨앗은 모래와의 접촉률이 커지게 되며 발아를 증진시키게 된다. 식물을 심는 계절은 늦여름과 이른 가을사이 가능할 뿐만 아니라 봄과 여름사이의 기간에도 가능하다. 봄과 여름사이에 식물을 심는 것이 효과적이는데 이는 호밀의 뿌리계통의 분진 고정화 능력을 일년이 상 유지시켜 주기 때문이다.

상기 두 가지 방법을 종합하면 다음 절차에 의해서 고정화 시키는 것이 효과적임을 알 수 있다.

- 비료 분무기를 사용하여 고정화될 지역의 표면에 석회를 균일하게 뿌린다.
- TLS 수용액을 hydroseeder를 사용하여 표면에 뿌린다.
- 경작기를 사용하여 고정화 처리된 지역의 표면을 압축시킨다.
- 겨울 호밀과 다년생 초목류의 씨앗을 seeder를 사용하여 고정화 처리 지역에 봄과 여름사이 뿌린다.
- TSL 수용액을 다시 한번 고정화 처리된 지역에 뿌리고 표면 고르는 장비를 사용하여 표면을 압축시킨다.
- 건조기에는 이들 지역에 물을 수시로 뿌린다.

씨앗의 소비율은 호밀의 경우 200 kg/ha, 다년생 초목류의 경우 30 kr/ha 이며 호밀 씨앗은 표면으로부터 4~6 cm의 깊이로 심는것이 바람직하다. 물은 100~300 m³/ha의 비율로 뿌려준다.

1987년 7월 본 기술의 이용이 “Urgent Group of the Governmental Committee”에 의해 결정되었으며 254 ha의 모래지역이 고정화되었다. 대부분의 지역에 있어서 호밀은 잘 성장하였으며 겨울에도 양호한 상

태를 유지하고 있었다. 1988년 4월에도 250 ha의 지역이 이 방법으로 고정화되었다.

본 기술은 제염된 지역들을 숲으로 변화시키고자 할 때 초기에 적용되어질 수 있는 효과적인 방법이며 호밀은 오염확산 억제체로서 주요 역할을 한다.

현재까지도 제염된 지역을 고정화하거나 재 경작하기 위한 분진 부유 억제제의 개발이 계속되고 있으며 체르노빌 핵 사고에 의해 오염된 지역에 대해 이들을 완전히 청정화 하는 데에는 수년의 기간이 더 소요될 것이다.

3.2.7. PVA 의 고정화 성능 개량 연구^{20,21)}

PVA의 성능을 향상시키기 위해 PVA와 수소결합을 형성할 것으로 예측되는 PMAA(polymethacrylic acid)를 혼합하여 이에 대한 성능을 파악하였다.

초기 PVA 농도를 변화시키는 조건에서 log [PMAA]에 대한 pH 변화를 측정하였으며 이를 그림 3에 도시하였다. 주어진 [PMAA]에서 초기 [PVA]가 증가함에 따라 pH도 증가하는 경향을 보여준다. 이 pH 상승은 PVA와 PMAA 사이의 수소결합에 의해 PMAA에 존재하던 수소이온의 해리가 억제되었다고 가정할 수 있다.

상기 가정과 Modified Handersson-Hasselbach 식을 사용하고, 데이터를 curve-fitting 시킴에 의해 그림 4를 얻을 수 있으며 이를 통해 PVA와 PMAA 사이에

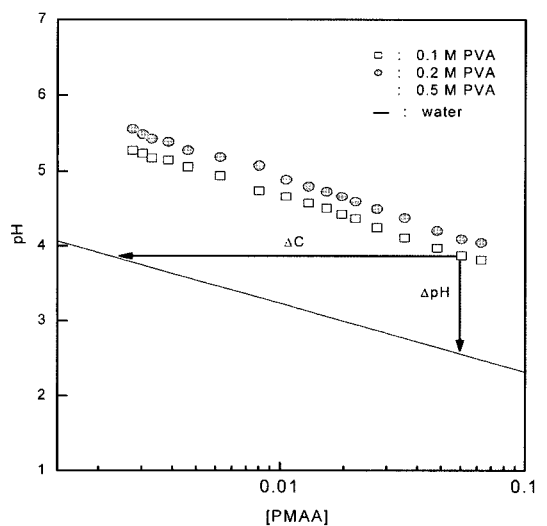


Fig. 3. Plot of pH against Log [PMAA] under various initial PVA concentration.

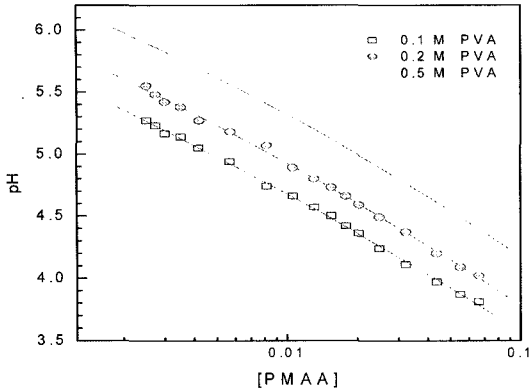


Fig. 4. Curving fitting by the model equation.

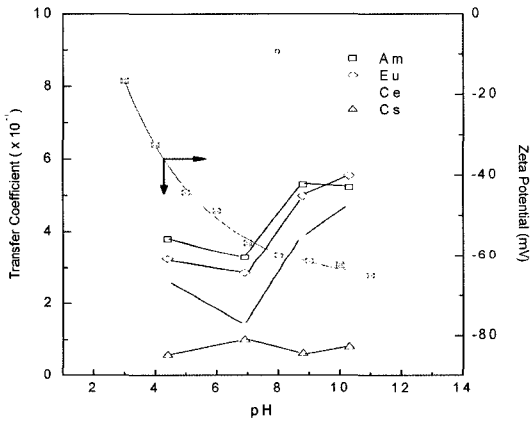


Fig. 5. Transfer coefficient and zeta potential against the solution pH.

complex 가 형성됨을 확인할 수 있다.

그림 5는 용액의 pH 변화에 따른 전이계수와 모래의 표면 전하를 도시한 것이다. 실험에 사용된 용액 모두에 대해 주요 방사성 핵종인 세슘을 가장 효율적으로 고정화 시키며, 표면 전하는 고정화 용액이 염기성으로 갈수록 감소하는 경향을 보여준다.

4. 결 론

체르노빌 핵사고 당시 토양이나 건물에 존재하는 방사성 분진의 고정화에 대한 기준이 설정되어 있지 않았으며 고정화제의 성능 및 적용 후 환경에 미치는 영향에 대한 연구가 충분하지 않았었다. 고정화제는 크게 석유나 목재산업에서 발생한 부산물(oil slime, lignosulfonate, lignin, asphalt, latex..)과 합성 고분자(PVA, silicate polyelectrolyte complex...)

의 두 분류로 분류될 수 있다. 산업계에서 발생한 부산물로 만든 고정화제의 장점은 가격이 저렴하고 손쉽게 구할 수 있다는 것이다. 대단위 지역 고정화의 궁극적인 목표는 오염 지역을 청정화 함으로써 자연 환경이 재생될 수 있는 여건을 조성하는 것이어야 한다. 이를 위해서는 식물류가 성장할 수 있는 토양 조건을 만들어 주는 것이 바람직하다. 체르노빌의 경험으로부터 오염된 지역에 다년생 초목류 씨앗을 고분자 물질과 함께 심는 것이 필요함을 확인하였다. 겨울 호밀류는 성장 시에나 죽은 후 뗏장을 형성하기 때문에 고정화 시키는 능력이 우수하다. 고정화제의 적용 시 고려되어야 할 주요 인자로서 토양의 종류, 토양 하부에 존재하는 지하수의 깊이, 오염지역의 방사선 준위에 따른 방사선 피폭 정도, 고정화된 지역과 인근 지역과의 관계, 고정화제를 운송하기 위한 수단 및 적용방법, 날씨, 고정화제의 물성, 이들의 가격 및 운송료, 초목류의 성장 특성 등이 있으며, 이들 인자의 최적화가 필요하다. 1986년 발생한 체르노빌 원전 핵사고가 환경에 미치는 영향은 2000년 영국 등의 연구²²에도 보고되고 있다. 가능성은 희박하지만 핵사고 발생 초기 방사능 오염의 확산에 대비함으로써 환경에 미치는 악 영향을 최소화하려는 노력이 필요하다.

참고문헌

1. IAEA, Technical Report Series, No. 300, Vienna (1989).
2. K. W. Nicholson and J. B. Hedgecock: J. Environ. Radioactivity **14** (1991).
3. G. Dosmet: Rep. EUR 12544N (1991).
4. 오원진: KAERI-NEMAC/RR-55/91(1992).
5. J. J. Tawil and F.C. Bold: Rep. PNL-4903, Pacific Northwest Laboratories, Richland, WA (1983).
6. B.W Church: Workshop on Environmental Decontamination, Oak Ridge, December 1979: Rep. CONF-791234 (1981).
7. P. E. James and R. G. Menzel: US Department of Agriculture Bulletin No. 1469 (1973).
8. T. A. Vysotina, V. A. Zemlyanskaya and K.D. Titova: Rep. of 2nd All Union Conference, Riga (1989).
9. F. A. Cotten and G. Wilkinson: Advanced Inorganic Chemistry-A Comprehensive Text, Interscience Publisher (1966).
10. J. D. Roberts and Marjorie C. Caserio: Modern Organic Chemistry, W. A. Benjamin Inc. (1967).

11. H. J. Cantow: *Advances in Polymer Sciences*, Vol. 45, Springer-Verlag (1982).
12. A. S. Michales, G.L. Falkenstein and N.S. Schneider: *J. of Phys. Chem.* **69** (1965) 1447.
13. A. S. Michales: *Ind. Eng. Chem.* **57** (1965) 32.
14. V. F. Smolen, D. E. Hahman: *J. of Colloid Interface Sci.*, **42** (1973) 70.
15. Y. Osada: *J. Polym. Lett. Ed.* **18** (1980) 281.
16. L.A. Mamayev, E.A. Galkin, S.L. Skanov, A.S. Polyakov and C.V. Mikeikin: Reports of the First All-Union Scientific Tech. Meeting on Results of Liquidation of the Aftereffects of the Cher. NPP Accident, Chernobyl **88** (1988).
17. S. V. Mikeikin, L.A. Mamaev, K.A. Rybakov, A.N. Alekseev: Reports of the Second All-Union Scientific Tech. Meeting on Results of Liquidation of the Aftereffects of the Chernobyl NPP Accident, Chernobyl **90** (1990).
18. S. P. Mesyates, N. N. Melnikov, V.N. Pshenichnyhk, V. M. Starodumov and A.K. Sukhoruchkin: Reports of the Second All-Union Scientific Tech. Meeting on Results of Liquidation of the Aftereffects of the Chernobyl NPP Accident, Chernobyl **90** (1990).
19. K. I. Patrilyak, V. V. Blagoev, V. P. Kukhar, A. E. Lesivestrov, Yu. B. Andreev, Yu. N. Samoilenko, V. V. Boiko, V. I. Komarov, M. I. Dushinsky, A. B. Ivanov and V. P. Belokur: *Ibid.* (1990).
20. H. J. Won, B. G. Ahn and W. Z. Oh: *J. of Korean Nuclear Society*, **27** (1995) 1.
21. H. J. Won, B. G. Ahn, C. H. Jung, G. N. Kim and W. Z. Oh: *J. of Korean Nuclear Society*, **32** (2000) 3.
22. J. T. Smith, R. N. J. Comans, N. A. Beresford, S. M. Wright, B. J. Howard and W. C. Camplin: *Nature*, **405** (2000) 141.