



KORAD

제7회 방사성폐기물 관리 경진대회 아이디어 및 논문 우수사례집

2022. 11.



CONTENTS

최우수상

산업부장관상

논문

방사성폐기물 안전관리 방안

방사성 농축폐액 분말과 폐이온교환수지를 효율적으로 고형화 할 수 있는 인산 기반 지오폐리머 고화체 개발

김 병 관 포항공과대학교

우수상

공단 이사장상

논문

방사성폐기물 효율적 관리 방안

폐수로부터 방사선 금속 이온을 제거하기 위한 나노점토의 격자 조작 및 나노하이브리드 기법 개발

박종현, 윤채원, VidyaChandrabose 동국대학교

아이디어

총상이중수산화물을 이용하여 벤토나이트 완충재 음이온 흡착능 향상 방법 개발

김 주 은 포항공과대학교

장려상

방사성폐기물 학회장상

논문

방사성폐기물 안전관리 방안

GIS 기반 위험도 평가 활용 방폐물 처분장 기후변화 적응형 환경안전 모니터링 시스템 구축

유강현, 조희찬 고려대학교 양호준 연세대학교

방사성폐기물 효율적 관리 방안

경주 방사성폐기물 복합 처분시설의 효율적 운영을 위한 주요 핵종 화학적 특성 고찰

변형진, 이유림, 정우규 울산과학기술원

아이디어

고준위방폐물 처분장 부지선정의 사회적 수용성 제고를 위한 VR 적용 방안

정 해 람 경희대학교

방폐장 내부 Gravity flow를 이용한 드럼운반 시스템

김 태 현 성균관대학교

제7회 방사성폐기물 관리 경진대회 아이디어 및 논문 우수사례집

장관상 - 최우수 논문

01

방사성폐기물 안전관리 방안

방사성 농축폐액 분말과 폐이온교환수지를
효율적으로 고형화 할 수 있는 인산 기반 지오폐리머 고화체 개발

김 병 관 포항공과대학교



요약문

본 연구에서는 인산 기반 지오폐리머라는 새로운 고화체 물질로 고형화 처분 대상인 농축폐 분말과 폐이온 교환수지를 고형화하였다. 모의 농축폐액 분말을 담지한 지오폐리머의 최대 담지율 30 wt% 였으며 이 때 7 일 압축강도는 약 15 MPa로 나타났다. 기존 시멘트 고화체와 비교하였을 때 담지율은 3배, 압축강도는 7배 이상 향상되었다. 인수기준 시험인 열순환, 방사선조사, 침수 시험 후 지오폐리머의 압축강도는 인수기준 값인 3.445 MPa를 초과하였으며 침출지수는 7.5로 인수기준 6.0보다 높게 확인되었다. 즉, 지오폐리머 고화체는 농축폐액을 효율적으로 담지하는데 있어 시멘트 고화체보다 적합함을 의미한다. 폐이온교환수지의 경우 최대 담지율은 40 wt%, 7일 압축강도는 7 MPa로 확인되었으며 인수기준 시험 후에도 6 MPa 이상의 압축강도가 확보되었다. Co, Cs, Sr의 침출지수는 각각 8.46, 9.02, 10.66으로 높게 나타났다. 기존 시멘트 고화체보다 담지율은 2배 이상 높았으며 이온교환수지의 팽창에 의한 물리적 열화는 확인되지 않았다. 폴리머 고화체에서 발견되는 층분리 등의 문제 또한 확인되지 않았으며 특별하게 추가적인 전처리 없이 이온교환수지를 안전하게 고형화하는 것이 가능하였다. 본 연구결과는 안전한 처분이 필요한 방사성 농축폐액 분말 및 폐이온교환수지를 고형화 처분하는데 있어 새로운 고형화 물질을 제시하고, 향후 이를 적용하는데 있어 과학적인 근거로 사용 가능할 것이다.

목 차

I. 서론

1. 방사성 농축폐액 분말
2. 방사성 농축폐액 고화체 개발 현황
3. 방사성 폐이온교환수지
4. 방사성 폐이온교환수지 고화체 개발 현황
5. 알칼리 및 인산 기반 지오폐리머

II. 본론

1. 모의 방사성 농축폐액을 담지한 지오폐리머 고화체의 인수기준 시험 결과
2. 모의 방사성 폐이온교환수지를 담지한 지오폐리머 고화체의 인수기준 시험 결과

III. 결론

I. 서론

1. 방사성 농축폐액 분말

가압경수로 운영시 원자로의 출력과 반응도를 조절하기 위해 약 500-2000 ppm의 붕산 (boric acid, H_3BO_3)가 냉각수에 첨가된다. 따라서 가압경수로에서 수집되는 액체폐기물에는 고농도 붕소 (boron, B)가 포함되어 있다. 수집된 액체폐기물은 원전 내부에 설치된 농축폐액 건조설비 (Concentrate Waste Drying System, CWDS)에서 농축 및 건조 과정을 통해 분말 상태로 처리되고 있다. CWDS에서 전처리된 농축폐액 분말은 수십 nm ~ 수 μm 크기의 입자와 다양한 형상을 가지고 있다. 농축폐액 분말의 주 성분은 B_2O_3 약 63%, Na_2O 약 10%인 것으로 알려져 있으며, 유동/분산성이고 중·저준위 방사성폐기물로 분류되어 적절한 고형화 처분이 필요하다 (Kim et al., 2021). 2020년 기준 고형화 처분이 필요한 방사성 농축폐액의 양은 200 L 드럼 기준 약 20,015 드럼으로 알려져 있다.

2. 방사성 농축폐액 분말 고화체 개발 현황 (Kim, B., et al., 2021)

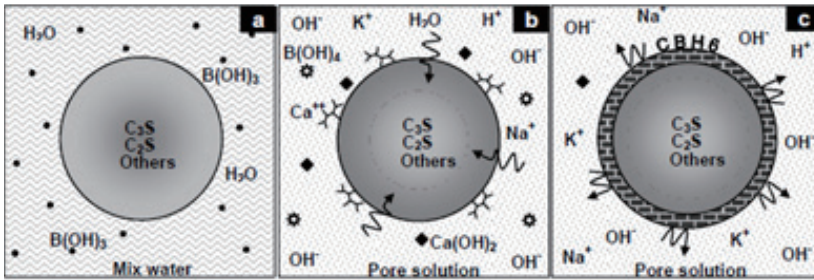
농축폐액 분말을 고형화하기 위한 방안으로 시멘트, 파라핀 왁스, 유리, 폴리머 고형화 등이 1980년대부터 연구되어 왔다.

(1) 시멘트 고형화

시멘트 고형화는 전세계적으로 널리 사용되고 있는 고형화 방법으로 작업 공정이 단순하며 가격이 저렴하고, 물질에 대한 이해도가 매우 높다는 장점이 있다. 그러나 시멘트의 미세구조는 다공성이기 때문에 내열성과 내화학성이 다소 떨어지며 핵종 침출 가능성이 높다. 또한, 시멘트의 주 성분인 Ca와 농축폐액 분말의 B의 화학 반응하기 때문에 시멘트는 농축폐액 분말 고화체 물질로 적합하지 않은 것으로 알려져 있다. Ca와 B의 주요 반응 메커니즘은 다음과 같다 (Davraz, M., 2010).

- 1) Portlandite ($Ca(OH)_2$)와 물이 반응하여 염기성 조건이 형성된다.
- 2) 수용성 붕산염 (soluble borate)이 빠르게 용해되어 $B[OH]_4^-$ 가 형성된다.
- 3) CaO와 같은 시멘트의 반응성 Ca와 $B[OH]_4^-$ 가 결합하여 시멘트 입자 표면에 불용성 칼슘 붕산화물 ($2CaO \cdot 3B_2O_3 \cdot 8H_2O$, $CaO \cdot B_2O_3 \cdot 6H_2O$ 등)을 형성하여 시멘트의 수화반응을 저해한다.

<그림 1> B0 시멘트 수화반응에 미치는 영향 (Davraz, M., 2010).



결과적으로 B에 의해 시멘트의 응결 (setting)이 매우 지연되고 압축강도 또한 낮아지게 되어 시멘트 고화체에서 농축폐액 분말의 담지율은 10 wt% 이하로 매우 낮다.

(2) 파라핀 왁스 고형화

파라핀 왁스 고형화는 파라핀의 무게비에 따라 시멘트 고화체의 압축강도 기준값을 만족할 수 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 무기물과 유기물의 극성 차이로 인해 고체 간 분산성이 좋지 않아 파라핀 양이 일정량 이하일 경우 층분리가 쉽게 발생하여 압축강도가 낮아진다는 단점이 있다. 또한, 장기 침출 실험 결과 B, Co, Sr이 초기 함유량 대비 최대 70%가 침출된다.

(3) 유리 고형화

유리 고형화는 핵종의 분자간 상호작용을 통해 유리구조 내에 안정하게 핵종을 가둘 수 있어 내침출성과 화학 저항성이 우수하다는 장점이 있다. 그러나 유리 고화체를 제조할 때 1200 ℃ 이상의 고온 공정이 필요하여 제조 비용이 매우 비싸다. 또한, 유리 고화체 설비에서 농축폐액 분말을 전처리 없이 설비에 투입하게 될 경우 배기팬에 의한 부압으로 인해 전 배기체 처리설비로 폐기물이 유입될 가능성이 있어 필터 차압상승, 분진재 순환설비의 부하 등의 문제가 발생할 가능성이 있다. 이외에도 대량의 유리 고화체를 제조하는 것이 현실적으로 어렵기 때문에 내화화학성이 우수할지라도 농축폐액 분말을 담지하기 위한 고화체로는 적합하지 않다.

(4) 폴리머 고형화

폴리머 고형화는 압축강도와 내침출성이 우수한 것이 특징이다. 그러나 농축폐액 분말의 효과적인 폴리머 고형화를 위해서는 액상 규산나트륨 및 소석회를 사용하여 과립화하는 전처리 단계가 필수적이다. 전처리 공정이 폴리머 고형화에 중요한 역할을 하기 때문에 고화체를 제조하는 공정이 다소 복잡해지며 2차 방사성폐기물의 발생이 야기될 수 있다는 단점이 있다.

3. 방사성 페이온교환수지

이온교환수지는 3차원 구조의 고분자 물질 (polystyrene 또는 divinyl benzene)에 이온교환기를 결합시킨

것으로 극성, 비극성 용액 중에 녹아있는 이온성 물질을 교환, 정제하는 물질이며 원자력발전소의 여러 액체 폐기물 처리계통에서 다양한 방사성핵종을 제거하기 위해 사용되고 있다. 국내 가압경수로에서는 양이온, 음이온 이온교환수지가 동일 당량비로 혼합되어있는 복합수지 (IRN-150 등)을 이용하여 폐액 내 방사성 핵종 (90Sr, 60Co, 137Cs, 235U, 238U 등)을 포획/제거한다. 이온교환수지는 기계적 강도와 화학적 저항성이 우수한 고분자 중합체로 구성되어있고 표면의 기능기가 방사성 핵종과 이온교환되어 남아있기 때문에 방사성핵종을 포획한 पे이온교환수지로부터 방사성 핵종을 분리/추출하는 것은 매우 어렵다. 따라서 원자력 발전소에서 발생하는 방사성폐기물 중 가장 처리가 어려운 가연성 폐기물이다. 2020년 기준 고형화 처분이 필요한 방사성 पे이온교환수지의 양은 200 L 드럼 기준 약 13,376 드럼으로 알려져 있다.

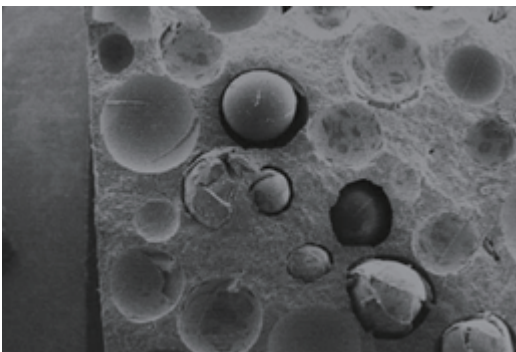
4. 방사성 पे이온교환수지 고화체 개발 현황 (Li, J., and Wang, J. (2006))

방사성 पे이온교환수지도 농축폐액 분말과 마찬가지로 중·저준위 방사성폐기물로 분류되어 적절한 고형화 처분이 필요하나, 현재까지 국내에서 개발된 기술을 이용하여 처분한 사례는 없다. 각각의 고형화 물질의 기본적인 장·단점에 대해서는 <서론-2. 방사성 농축폐액 고화체 개발 현황>에서 간략하게 다루었기 때문에 본 절에서는 이온교환수지 고형화 사례와 한계에 대해 소개한다.

(1) 시멘트 고형화

시멘트를 이용한 방사성 पे이온교환수지의 고형화는 상당히 어려운 것으로 보고되고 있다. 이는 पे이온교환수지가 시멘트에 물리적으로만 결합되어 있으며 (그림 2), 시멘트의 배합수 (free water 또는 mixing water)를 흡수하여 부피가 팽창 (swelling)하고 이로 인해 시멘트의 구조가 붕괴되어 결과적으로 시멘트 고화체의 크랙, 탈락과 같은 물리적 열화를 초래할 수 있기 때문이다. 또한, 시멘트 공극수 내 풍부하게 존재하는 free Ca가 이온교환수지 내 존재하는 Sr과 같은 핵종과 이온교환되어 핵종의 누출이 발생할 수 있다. 시멘트 고화체는 पे이온교환수지의 담지율 측면에도 문제가 있는데, पे이온교환수지를 많이 담지할 수록 시멘트 고화체의 내구도는 급격하게 떨어져 담지율 20 wt% 이상을 달성하기 어렵다.

<그림 2> पे이온교환수지를 포함한 시멘트 고화체의 미세구조 (Li, J., and Wang, J. (2006))



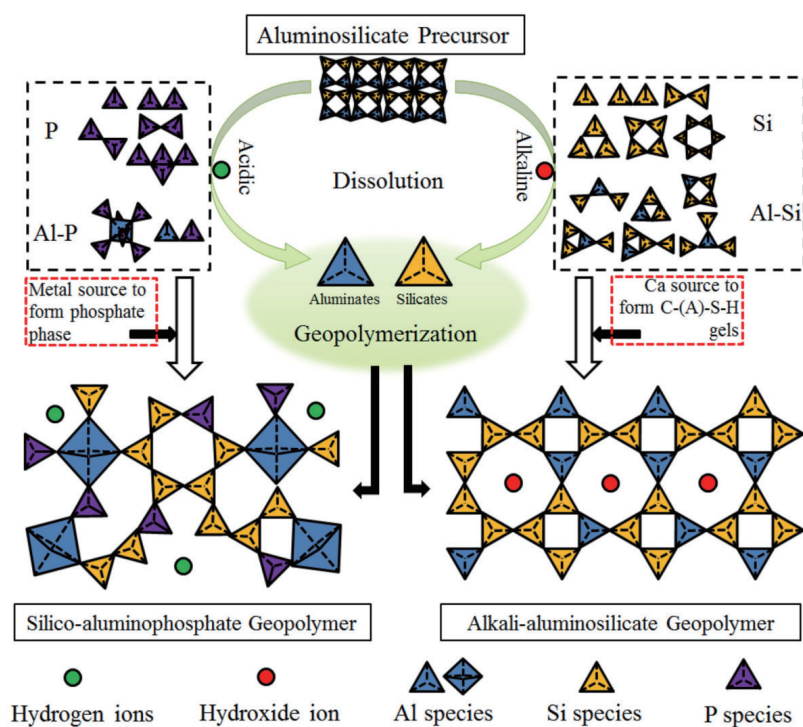
(2) 폴리머 고형화

폴리머 고형화의 경우 시멘트 고형화에 비해 높은 압축강도와 높은 담지율을 달성할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 양생하는 과정 중 पे이온교환수지가 아래로 가라앉아 결과적으로 पे이온교환수지가 아래쪽에 몰려있는 불균질한 고화체가 제조될 가능성이 높다. 이를 보완하기 위해 पे이온교환수지를 건조 및 분쇄하여 분말형태로 전처리하는 방안이 제시되었으나, 해당 전처리 방안은 방사능이 높은 पे이온교환수지를 가공하기 때문에 2차, 3차 방사성폐기물이 발생하게 되어 적합하지 않다. 또한, 폴리머는 유기물 고분자가 주 성분이기 때문에 화재 발생 시 무기물 고화체에 비해 안전성이 다소 떨어진다는 단점이 있다.

5. 알칼리 및 인산 기반 지오폐리머

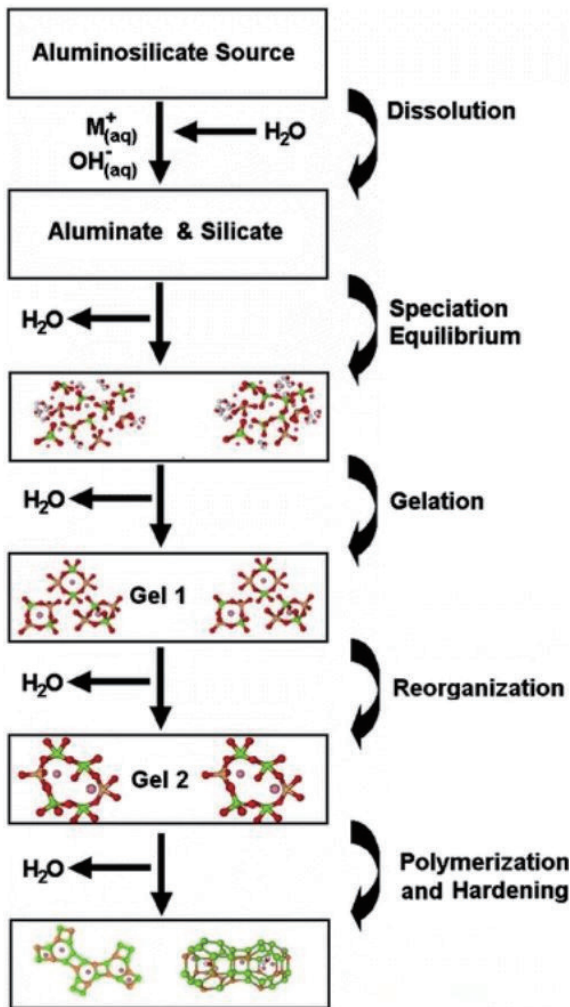
지오폐리머는 시멘트를 대체할 건축재료 물질로, 석탄재 (플라이애쉬, 바텀애쉬, 잔사회 등) 또는 메타카올린과 같은 비정질 알루미늄규산염 물질을 알칼리 자극제 또는 산 자극제와 반응시켜 합성하는 물질이다. 시멘트와 달리 원재료를 고온 소성하는 공정이 필요하지 않기 때문에 이산화탄소 배출이 매우 적어 친환경 건축재료로 주목을 받고 있다. 2000년대 초반까지 지오폐리머의 화학적 정의는 ‘알칼리 자극제와 비정질 알루미늄규산염물질의 축중합반응에 의해 형성되는 물질’으로 여겨졌으나, 최근 알칼리 자극제 대신 인산 자극제를 사용하는 지오폐리머가 개발되고 주목을 받음에 따라 지오폐리머는 크게 알칼리 지오폐리머 및 ‘인산 지오폐리머’로 구분된다고 볼 수 있다 (그림 3).

<그림 3>알칼리 지오폐리머 및 인산 지오폐리머 개략도 (Wang, Y. S., et al., 2019)



‘알칼리 지오폴리머 (alkaline geopolymer)’는 비정질 알루미늄규산염 물질을 액상규산나트륨 (sodium silicate solution) 또는 액상규산칼륨 (potassium silicate solution)과 같은 알칼리성의 용액과 혼합하여 제조하여 얻을 수 있으며 상온 또는 60 ℃ 내외의 저온에서 경화된다. 앞서 언급한 바와 같이 지오폴리머 반응은 시멘트의 수화반응과 달리 실리케이트 모노머 (silicate monomer) 및 알루미늄네이트 모노머 (aluminate monomer)의 축중합반응에 의해 이루어지며 반응 매커니즘은 크게 4단계로 구분된다 (그림 4). 먼저 알칼리 자극제에 의해 원재료 물질이 용해되어 실리케이트와 알루미늄네이트가 방출된다. 방출된 실리케이트와 알루미늄네이트는 두 번째 반응 단계인 gelation에 의해 결합하게 된다. 이후 형성된 gel끼리 결합 및 재정렬되고 최종적으로 축중합반응을 거쳐 경화되게 된다 (그림 4).

<그림 4>알칼리 지오폴리머의 반응 매커니즘 (Pouhet, R., 2015)



수화반응을 통해 수화광물이 형성되어 강도를 발현하는 시멘트와 달리, 지오폴리머에서는 수화광물이 형성되지 않으며 최종적으로 생성되는 구조 또한 원자의 결합주기가 짧은 비정질 물질이다. 따라서 미세구조가 전체적으로 유리와 비슷한 매끈한 구조를 가지고 있으며 치밀한 것이 특징이다. 또한, 원재료의 화학 특성을

고려하여 정량적 배합비를 도출하고 이를 통해 지오폐리머를 제조할 경우 7일 압축강도가 80 MPa 이상의 고강도 지오폐리머를 얻을 수 있다. 이외에도 내열성과 내화학적, 독성원소 (방사성 핵종 또는 중금속) 고정화 능력이 우수한 것이 특징이다.

‘인산 지오폐리머’는 본격적으로 연구된지 몇 년 되지 않았으나, 현재까지 보고된 연구결과에 의하면 시멘트보다 우수한 물리·화학적 특성은 물론이고 알칼리 지오폐리머 보다 제조하는 방법이 쉽다는 것이 특징이라고 볼 수 있다. 메타카올린을 원재료로 사용하는 알칼리 지오폐리머는 보통 M/Al (M = 1가 양이온), Si/Al, H₂O/Al 몰 비율에 따라 지오폐리머의 물리·화학적 특성이 많이 좌우된다. 플라이애쉬를 원재료로 사용하는 알칼리 기반 지오폐리머의 경우 플라이애쉬의 입자크기, 비표면적, 광물학적·화학적 특성이 아주 중요한 인자로 작용하게 된다. 플라이애쉬의 경우 다양한 종류의 결정질 물질과 상당량의 비정질 물질이 함께 하기 때문에 이를 정량적으로 정확하게 분석하는 것이 매우 어려워 지오폐리머를 만들기 까다롭다는 견해가 많다. 인산 지오폐리머는 대개 메타카올린을 원재료로 사용하고 고려해야할 인자가 P/Al 및 H₂O/Al 두 가지 정도로 크게 줄어들기 때문에 알칼리 지오폐리머에 비해 제조가 더 용이하다고 볼 수 있다.

알칼리 지오폐리머는 약 1980년대부터 연구가 지속되어 왔으며 최근에는 방사성폐기물 처분을 위한 고형화 물질로 주목을 받고 있다. 국내에서는 Hybrid 제염 공정 중 발생하는 sulfate가 다량 함유된 슬러지 및 iron oxide, nickel 등의 금속이 다량 함유되어 있는 부식성 슬러지, 농축폐액 분말을 메타카올린을 원료로 사용한 알칼리 지오폐리머로 고형화를 한 사례가 보고된 바 있다. 국외의 경우 유/무기 폐이온교환수지, 폐오일, 후쿠시마 인근 지역 토양 등을 알칼리 지오폐리머로 고형화 한 연구들이 보고되었으며, 최근 프랑스에서는 고준위방사성폐기물 처분장 채움 물질로 알칼리 지오폐리머를 연구 중인 것으로 알려져 있다.

알칼리 지오폐리머를 원자력 분야 및 방사성폐기물 분야에 적용하려는 연구들이 활발하게 진행되고 있는 것과는 달리 인산 지오폐리머를 활용한 연구는 매우 제한적이다. 이는 앞서 언급한 것처럼 인산 지오폐리머 물질이 개발된지 얼마 되지 않아 물질에 대한 이해도가 높지 않고 기초적으로 진행되어야 할 연구 분야가 아직 진행중이기 때문일 것이다. 그렇다 하더라도 인산 지오폐리머의 반응 매커니즘이나 최종적으로 얻어지는 물질이 알칼리 지오폐리머와 크게 다르지 않고 우수한 물리 화학적 성능도 보이기 때문에, 인산 지오폐리머를 방사성폐기물 분야 및 고화체로 활용하는 것은 시도해 볼 수 있는 주제일 것이다.

본 연구에서는 국내에서 현재까지 뚜렷한 고형화 처분 방안이 제시되지 않은 방사성 농축폐액 분말과 폐이온교환수지를 인산 지오폐리머 고화체로 고형화한 후 고화체 인수기준 시험을 수행하여 인산 지오폐리머가 고화체로서 실직적으로 사용 가능한지 평가하였다.

II. 본 론

1. 모의 방사성 농축폐액을 담지한 지오폴리머 고화체의 인수기준 시험 결과

(1) 모의 방사성 농축폐액 분말 제조

모의 방사성 농축폐액 분말은 한수원에서 공개한 정보에 따라 Sodium tetraborate decahydrate ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), sodium nitrate (NaNO_3), potassium nitrate (KNO_3), calcium nitrate ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), zinc nitrate ($\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), magnesium nitrate ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)를 이용하여 표 1과 같은 농도가 되도록 약 1리터의 탈이온수와 섞었다. 혼합물은 105 °C에서 약 1일 동안 건조 후 분쇄기에서 30초 동안 분쇄하여 분말 형태로 제조하였다.

<표 1> 모의 방사성 농축폐액 분말의 화학적 농도

원소	농도 (ppm)
B	221,490
Na	76,000
K	2,333
Ca	1,600
Zn	583
Mg	495

(2) 인산 지오폴리머 고화체 제조 및 평가 방법

인산 기반 지오폴리머의 원료로 메타카올린, 85% 인산 (H_3PO_4), 탈 이온수를 사용하였다. P/Al 몰 비율이 2.1 또는 2.5로 설계된 배합비에 따라 일정량의 인산과 탈이온수를 상온에서 약 2시간 동안 혼합하여 인산 자극제를 제조하였다 (표 2). 제조된 인산 자극제와, 메타카올린, 모의 방사성 농축폐액 분말을 공전 및 자전이 동시에 되는 믹서기로 혼합하여 지오폴리머 슬러리를 제조하였다. 이 때 방사성 농축폐액 분말의 담지율은 10, 20, 30, 40, 50 wt% 였다. 혼합된 지오폴리머 슬러리는 지름이 약 3 cm, 높이가 약 6 cm인 플라스틱 몰드에 옮겨 담았으며 전기 오븐을 이용하여 설계된 양생 조건에 따라 양생하였다 (표 2). 양생이 끝난 후 몰드를 탈형하고 상온에서 보관하였다.

지오폴리머 고화체의 인수기준 시험 항목으로 열순환 (30 사이클), 방사선조사 (106 Gy, 감마선), 침수 (90일), 침출 (90일) 시험을 수행하였다.

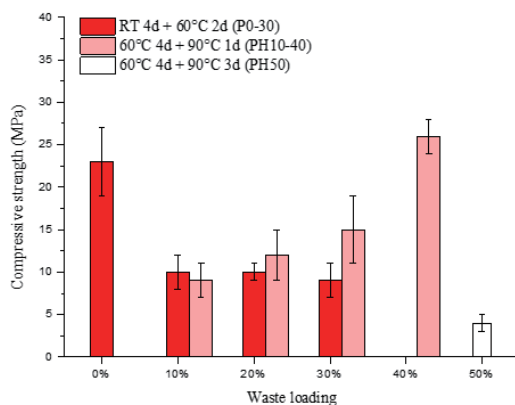
<표 2> 농축폐액 분말 인산 지오폐리머 고화체의 배합비 및 양생조건

시료명	P/Al 물 비율	농축폐액 담지율 (wt%)	양생조건
P0		-	
P10		10	
P20	2.1	20	상온 4일 + 60 °C 2일
P30		30	
P40		40	
PH10		10	
PH20	2.1	20	60 °C 4일 + 90 °C 1일
PH30		30	
PH40		40	
PH50	2.5	50	60 °C 4일 + 90 °C 3일

(3) 지오폐리머 고화체의 인수기준 시험 결과

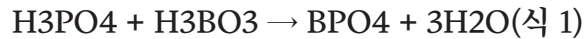
고화체 인수기준에 따르면 시멘트 고화체는 양생 28일 째에 압축강도를 측정하도록 되어있다. 지오폐리머에 대한 인수기준은 적립되어 있지 않으나 시멘트 대체물질인 것을 고려하여 인수기준 시험을 수행하였다. 지오폐리머는 높은 초기압축강도를 나타내는 것이 장점 중 하나이기 때문에 28일 압축강도가 아닌 7일 압축강도를 측정하였으며 결과는 그림 5와 같다.

<그림 5> 모의 방사성농축폐액을 담지한 지오폐리머 고화체의 7일 압축강도



상온과 60도에서 양생한 지오폐리머 고화체는 모의 농축폐액 분말의 담지율 이 증가할수록 낮은 압축강도를 나타내었으며 30 wt% 까지 담지하는 것이 가능하였다. 이는 담지율이 증가함에 따라 바인더 물질이 감소하여 강도가 낮아지는 일반적인 현상이다. 담지율이 30 wt% 일 때 7일 압축강도는 약 10 MPa로 인수기준인 3.445 MPa의 약 3배 높은 값이었다. 기존 연구의 시멘트 고화체 (담지율 10 wt%, 28일 압축강도 2 MPa)와 비교하였을 때, 양생 일수가 4배 짧았지만 담지율과 압축강도는 각각 3배, 5배 높은 것을 확인할 수 있었다.

지오폐리머의 압축강도는 양생 온도에 따라 증가 또는 감소할 수 있기 때문에 양생 온도를 60 ℃와 90 ℃로 변경하여 고화체를 제조하였다 (그림 5). 이 경우 압축강도는 담지율에 비례하여 증가하는 경향을 보였으며 최대 압축강도는 담지율이 40 wt%일 때 약 26 MPa로 확인되었다. 이는 인산 자극제와 모의 방사성 농축폐액 분말 내 존재하는 B의 반응에 의한 것으로 볼 수 있다. B는 pH가 낮은 산성 조건에서 3배위 (B(OH)₃)로 존재하게 되는데 3배위 B는 인산과 반응하여 boron phosphate (BPO₄)를 형성할 수 있다 (식 1).



Boron phosphate는 바로 침전되지 않기 때문에 반응 온도를 100 ℃ 이상으로 높여주거나 진공 조건이 제공되어야 한다. 본 실험에서는 100 ℃의 온도를 가하지 않았으나 인산 지오폐리머 반응은 발열반응 (exothermic reaction)이고, 배합비율에 따라 지오폐리머 경화 중 내부 온도가 120 ℃ 이상으로 올라가기도 한다. 즉, 지오폐리머 반응에 의한 고화체 내부 온도 상승이 boron phosphate가 형성될 수 있는 온도를 제공하여 boron phosphate의 형성을 이끌어 결과적으로 압축강도 증가에 기여했다고 볼 수 있다. 담지율이 50 wt%인 경우 7일 동안 열 경화를 했음에도 불구하고 압축강도가 약 5 MPa로 가장 낮게 나타났다 (그림 5). 이는 boron phosphate가 형성될 수 있는 온도가 충분히 제공되었음에도 바인더 역할을 하는 지오폐리머의 양 자체가 줄어들었기 때문일 것이다 (Kim, B., et al., 2022).

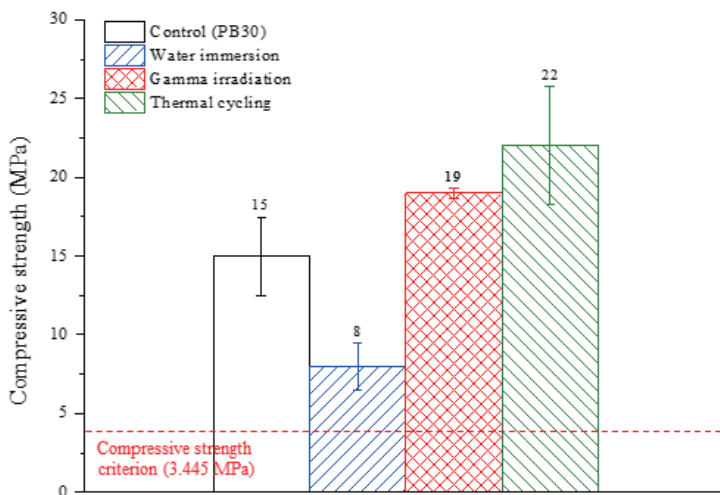
열순환, 방사선 조사, 침수, 침출 시험은 압축강도가 높은 60 ℃와 90 ℃에서 양생한 지오폐리머 고화체를 대상으로 수행하였다. 담지율이 40 wt%인 지오폐리머의 경우 압축강도가 제일 높았음에도 불구하고 침수 시험 중 고화체가 열화되는 것을 확인할 수 있었다 (그림 6). 이는 크게 두 가지 이유로 볼 수 있는데 첫 번째는 형성된 boron phosphate가 수용성 상이기 때문일 것이다. 저온에서 형성되는 boron phosphate는 비정질이며 온도가 증가할수록 결정화되고 안정한 상태에 이른다. 비정질 boron phosphate는 결정질의 경우보다 물에 잘 녹기 때문에 침수 시험 중 boron phosphate가 지오폐리머 고화체로부터 방출되어 침수 시험을 견디지 못한 것으로 판단된다. 두 번째는 3배위 B의 용해도 때문일 것이다. 앞서 언급한 것처럼 산성 조건에서 B는 B(OH)₃ 형태로 존재하게 되는데, 3배위 B는 4배위 B보다 용해도가 높아 물에 쉽게 녹는다. 지오폐리머 고화체에서 모의 방사성 농축폐액 분말은 3배위 B 또는 boron phosphate로 존재하고 있을 것인데, 두 물질 모두 물에 잘 녹는 성질을 갖고 있기 때문에 침수 시험 중 빠르게 침출되어 지오폐리머의 열화를 이끈 것으로 판단된다.

<그림 6> 모의 방사성 농축폐액 분말을 40 wt% 포함한 지오폴리머 고화체의 침수 시험 중 열화 모습



침수 시험 결과를 고려하여, 담지율 30 wt%의 지오폴리머에 대해 인수기준 시험을 수행하였다 (그림 7). 열순환 (30 사이클, 총 660시간) 시험 결과 압축강도는 15 MPa에서 22 MPa로 다소 증가하였다. 이는 60 °C 열순환 사이클이 열 양생과 같은 역할을 하여 지오폴리머 반응을 더 촉진시키고 결과적으로 압축강도증가 효과를 이끈 것으로 판단된다. 시멘트 고화체의 경우 수화광물이 열순환 시험 중 탈수 반응 (dehydration)에 의해 구조가 붕괴되어 열순환 시험을 통과하지 못할 수 있다. 그러나 지오폴리머는 수화광물에 의해 경화되는 것이 아니며 수화광물 또한 생성되지 않기 때문에 이러한 문제로부터 자유로울 수 있다. 또한, 공극 내 존재하는 물이 영하의 사이클에 의해 동결되어도 지오폴리머 구조 자체에는 큰 영향을 주지 않는다.

<그림 7> 지오폴리머 고화체의 인수기준 시험 후 압축강도 측정 결과



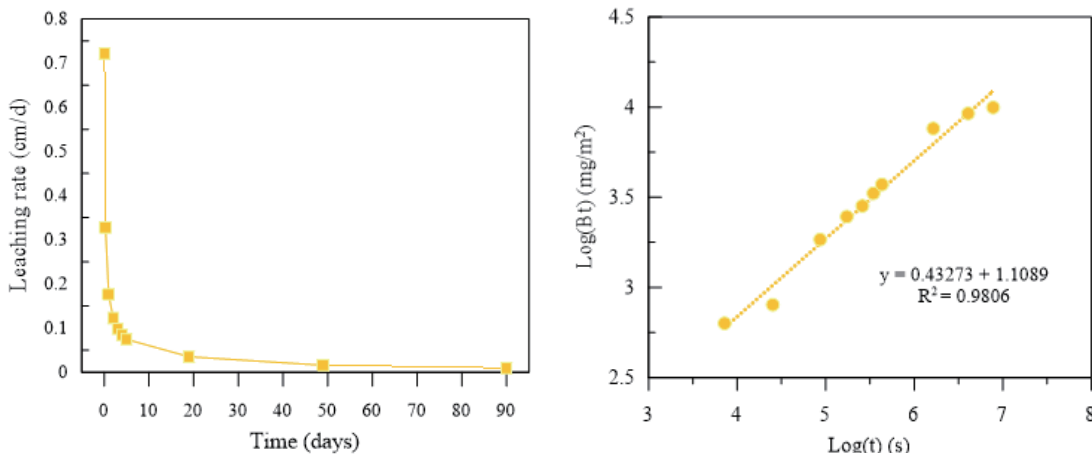
방사선 조사 후 압축강도는 소폭 상승한 19 MPa로 확인되었다 (그림 7). 방사선 조사 또한 지오폴리머 구조 자체에 영향을 주지 않는 것으로 알려져 있으나, 지오폴리머 내 존재하는 Si-O-Si 결합에는 영향을 줄 수 있다. 감마선은 Si-O-Si 결합각을 감소시키기 때문에 구조를 더 치밀하게 만들어 주는 효과가 있다. 인산 지오폴리머 제조 시 SiO₂가 첨가되지 않으나, 지오폴리머 반응 초기 단계인 용해 단계에서 Al이 방출됨에 따라

약 10% 내외의 비정질 SiO₂가 생성 되는 것으로 알려져 있다. 따라서 감마선에 의해 지오폴리머 내 존재하는 Si-O-Si 결합각이 감소하여 미세구조가 치밀해지고, 압축강도가 소폭 증가한 것으로 생각된다.

90일 침수 시험 후 압축강도는 8 MPa로 크게 감소하였다. 이는 앞서 설명한 것과 같이 물에 잘 용해되는 boron phosphate와 3배위 B가 침수 시험 중 방출되어 압축강도 감소를 유발한 것으로 판단된다.

침출 시험 결과 90일 평균 B의 침출지수는 약 7.5로 계산되었다. B의 침출 속도는 침출 초기 (~5일)에 가장 빨랐으며 이후 느려지고 점차 평형을 이루었다 (그림 8). B의 침출지수 기준은 정해진 것이 없으나, 주요 핵종 (Co, Cs, Sr)의 침출지수 기준인 6.0보다 큰 값이 나타난 것을 보아 지오폴리머의 침출 저항성 또한 우수한 것으로 확인되었다. 핵종의 침출 매커니즘은 시간과 침출된 핵종 양의 2차 방정식으로 추측해볼 수 있는데, Y절편의 값이 0.4-0.6 사이일 경우 침출 매커니즘은 확산에 의한 것이다. 본 연구에서 얻어진 Y절편 값은 약 0.43, R² 값은 0.98인 점을 고려하면 지오폴리머 고화체에서 B의 침출 매커니즘은 확산인 것으로 판단된다.

<그림 8> B의 침출 속도 (좌), B의 침출 매커니즘 (우)



전체적으로 인산 지오폴리머 고화체는 우수한 물리·화학적 특성을 나타내었으며 인수기준 시험 후에도 건전성이 유지되는 것을 확인할 수 있었다. 시멘트보다 4배 짧은 양생일수임에도 불구하고 약 7배 높은 압축강도와 3배 높은 담지율을 보였다. 또한, 무기물 고화체이기 때문에 유기물 고화체에서 발생했던 층분리, 압축강도 저하 등의 문제로부터 보다 자유로울 수 있다.

2. 모의 방사성 폐이온교환수지를 담지한 지오폴리머 고화체의 인수기준 시험 결과

(1) 모의 방사성 폐이온교환수지 제조

모의 방사성 폐이온교환수지는 양이온-음이온 복합수지 (IRN-150)을 기반으로 제조하였다. Chemical

Oxidation Reduction Decontamination (CORD) 공정에서 오염수 정화 및 핵종 제거를 위해 이온교환수지가 다량 사용되는 점을 고려하여 CORD 공정에서 발생할 수 있는 모의 폐액을 제조하였으며 침출 시험을 위해 Co, Cs, Sr을 일정량 첨가하였다 (표 3). 모의 폐액 제조를 위한 시약으로 cesium chloride (99.9%), iron chloride (97%), chrome chloride hexahydrate (98%), manganese chloride tetrahydrate (98%), nickel nitrate hexahydrate (97%), cobalt chloride (97%), strontium nitrate (97%)를 표 4와 같은 농도가 되도록 탈이온수에 첨가하였다. 이온교환수지:모의폐액의 중량비가 1:2가 되도록 준비된 모의폐액에 IRN-150을 첨가한 후 상온에서 7일 동안 교환하여 이온교환수지가 핵종을 충분히 흡착하도록 하였다. 이후, 폐액만을 제거한 뒤 지퍼백에 상온에서 폐이온교환수지를 밀봉하여 보관하였다. 이온교환수지 내 흡착되어있는 핵종의 양은 표 5와 같다.

(2) 인산 지오폐리머 고화체 제조 및 평가 방법

모의 방사성 폐이온교환수지를 포함한 인산 지오폐리머 고화체는 모의 방사성 농축폐액 분말을 포함한 인산지오폐리머 고화체 (II.본론-(2))에서 사용한 것과 동일한 원료 및 믹서기, 몰드를 사용하여 제조하였으며 자세한 제조 방법은 다음과 같다. 먼저 모의 폐이온교환수지의 세척 및 양생 중 팽창을 방지하기 위해 준비된 폐이온교환수지와 증류수를 중량비 0.8이 되도록 물과 혼합한 후 설계된 배합에 따라 (표 3) 준비된 일정량의 메타카올린, 탈이온수, 인산 자극제와 혼합한다. 이후 몰드에 옮겨담고 밀봉하여 경화한다 (표 3). 폐이온교환수지가 정전기적 반발력으로 물을 포획하고 있기 때문에 이를 고려하여 담지율에 따라 인산과 알루미늄의 비율을 다소 다르게 하였다.

경화된 폐이온교환수지 지오폐리머 고화체는 농축폐액 분말 지오폐리머 고화체와 마찬가지로 인수기준 시험인 열순환 (30 사이클), 방사선조사 (106 Gy, 감마선), 침수 (90일), 침출 (90일) 시험을 수행하였다.

<표 3> 폐이온교환수지 인산 지오폐리머 고화체의 배합비 및 양생조건

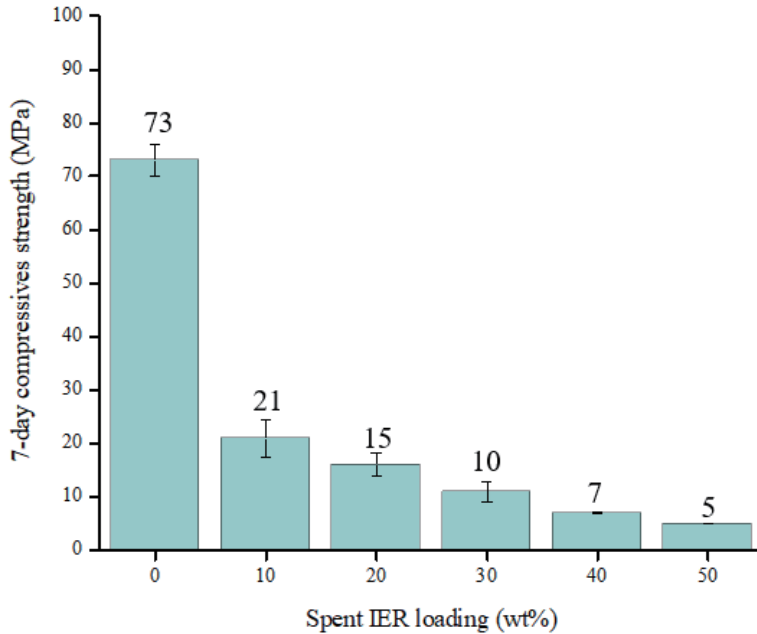
시료명	P/Al 물 비율	농축폐액 담지율 (wt%)	양생조건
PL0	1.1	-	상온 5일 + 60 °C 1일
PL10	1.0	10	
PL20		20	
PL30		30	
PL40	0.7	40	
PL50		50	

(3) 지오폐리머 고화체의 인수기준 시험 결과

폐이온교환수지를 포함하지 않은 지오폐리머의 7일 압축강도는 73 MPa로 높게 나타났다 (그림 9). 폐이온교환수지가 단 10 wt% 담지되었을 때 압축강도는 약 21 MPa로 3배 가량 낮아지게 되었다. 담지율이 증가

할수록 압축강도는 더욱 감소하였으며 담지율이 50 wt% 일 때 지오폐리머의 압축강도는 약 5 MPa로 나타났다. 이는 인수기준인 3.445 MPa를 만족시키는 값이나 인수기준 값을 약간 초과하는 값이기에 인수기준 시험은 담지율 40 wt%까지에 대하여 수행하였다.

<그림 9> 페이온교환수지 담지율에 따른 지오폐리머 7일 압축강도 변화

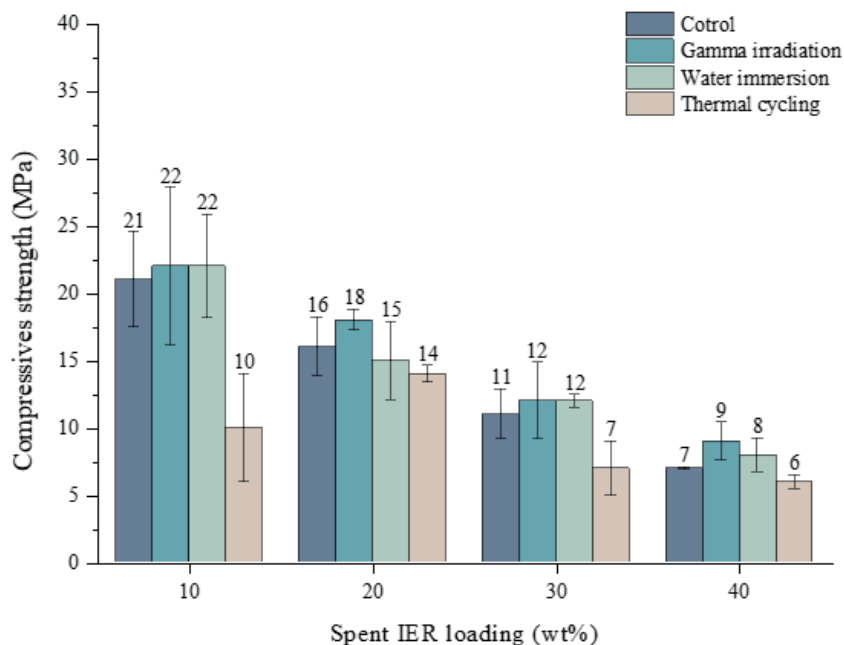


담지율 증가에 따른 압축강도는 지오폐리머의 물 함량이 증가하였기 때문으로 판단된다. 지오폐리머에서 물의 역할은 결합재 역할을 하는 이온들의 이동성을 높여주어 지오폐리머 반응에 참여하도록 하는 것이 주목적이며, 첨가된 물 대부분 지오폐리머 반응에 참여하지 않고 공극 내 남게 된다. 따라서 물 함량이 증가할수록 공극의 크기가 커지고 공극률이 올라가 물리적인 강도는 낮아지게 될 가능성이 있다. 기존 연구에 의하면 물의 양 단 2%를 감소시킬 경우 지오폐리머의 7일 압축강도는 37 MPa에서 80 MPa로 크게 향상된다. 물론 이 연구결과는 폐기물을 포함하지 않은 알칼리 지오폐리머의 경우이기 때문에 직접적으로 비교는 어려우나, 인산 지오폐리머와 알칼리 지오폐리머 모두 축중합반응이라는 동일한 화학반응에 의해 합성되는 것이기 때문에 물의 함량에 의해 압축강도가 크게 변하였음을 추측해 볼 수 있다. 한편, 이온교환수지 자체가 압축강도에도 영향을 줄 수 있는데 유기물 이온교환수지는 무기물인 지오폐리머에 화학적 결합이 아닌 물리적으로 결합(encapsulation)되어 지오폐리머 구조의 치밀성을 낮추게 된다. 이러한 점들이 복합적으로 작용하여 담지율이 증가하였을 때 지오폐리머의 압축강도는 낮아진 것으로 판단된다.

인수기준 시험 결과 담지율에 상관없이 모든 지오폐리머 고화체는 열순환, 방사선조사, 침수(90일) 시험 후 압축강도 기준인 3.445 MPa를 초과하였다(그림 10). 표준편차 값을 고려하면 인수기준 시험 전후 압축

강도가 비슷하기 문에 특정 시험이 지오폐리머의 압축강도를 변화시켰다고 보기는 어려운 것으로 생각 된다. 페이온교환수지는 물을 다량 함유하고 있고 유기물이기 때문에 열순환 시험과 방사선 조사 후 구조가 변화될 수 있다. 그러나 지오폐리머 고화체 자체가 견전성이 및 기계적 특성이 우수하기 때문에 이온교환수 지의 구조가 변할 수 있는 시험 후에도 일정 수준의 압축강도가 유지될 수 있었다고 판단된다.

<그림 10> 인수기준 시험 후 페이온교환수지 인산 지오폐리머 고화체 압축강도



침출 시험 결과 Co, Cs, Sr의 90일 평균 침출지수는 각각 8.46, 9.02, 10.66으로 계산되었다. 이 값은 인수기 준 값인 6.0을 넘는 수치였으며 이는 지오폐리머 고화체가 이온교환수지로부터 방출되는 방사성핵종의 이 동을 막는 물리적 차폐효과를 가지고 있음을 의미한다. 침출되는 속도는 침출 초기 5일 동안 빨랐으며 이후 에는 증가폭이 점차 감소하였다 (그림 11).알칼리 지오폐리머는 구조적으로 음전하 (negative charge)를 가 지고 있어 양이온 핵종 (Co, Cs, Sr 등)을 정전기적 힘으로 끌어당겨 지오폐리머 구조내에 화학적으로 결합 시킨다. 이로 인해 알칼리 지오폐리머는 대체적으로 양이온 흡착 및 고정화 하는데 있어 우수한 것으로 알 려져있다. 그러나 인산 지오폐리머의 구조는 전체적으로 중성을 띠거나 국부적으로 양전하를 가질 수 있다. 이 경우 오히려 정전기적 척력으로 양이온 핵종을 미뤄낼 수 있다. 따라서 알칼리 지오폐리머에서 만큼의 양이온 핵종 고정능을 기대하기는 어려울 수 있다. 그렇다 하더라도 비정질 구조로 치밀한 미세구조를 가졌 기 때문에 인수기준에서 요구하는 침출지수 값은 모두 달성할 수 있을 것이다.

III. 결 론

본 연구에서는 안전관리 및 고형화 처분이 필요하지만 뚜렷한 처분 방안이 없는 농축폐액 분말과 폐이온교환수지를 인산 기반 지오폴리머라는 새로운 물질을 이용하여 고형화하였다. 인산 지오폴리머 고화체는 기존 시멘트 고화체가 가지고 있던 낮은 담지율 및 낮은 압축강도와 같은 물리적 한계를 극복할 수 있었으며 인수기준 시험 후에도 고화체의 건전성은 유지되었다. 농축폐액 분말의 경우 30 wt%까지 담지하는 것이 가능하였으며 폐이온교환수지는 40 wt%까지 담지하는 것이 가능하였다. 각 인수기준 항목에서 제시하였던 압축강도 기준 또는 침출지수 기준 또한 모두 만족하였다. 이를 바탕으로 볼 때, 인산 지오폴리머 고화체는 농축폐액 분말 및 폐이온교환수지 뿐만 아니라 시멘트 고형화처분이 어려운 다양한 방사성폐기물들을 효율적이며 안전하게 처분할 수 있는 후보물질이 될 수 있을 것이다.

[참고문헌]

- Kim, B., Lee, J., Kang, J., and Um, W. (2021). Development of geopolymer waste form for immobilization of radioactive borate waste. *Journal of Hazardous Materials*, 419, 126402.
- Davraz, M. (2010). The effects of boron compounds on the properties of cementitious composites. *Science and Engineering of Composite Materials*, 17(1), 1-18.
- Li, J., & Wang, J. (2006). Advances in cement solidification technology for waste radioactive ion exchange resins: A review. *Journal of hazardous materials*, 135(1-3), 443-448.
- Wang, Y. S., Alrefaei, Y., and Dai, J. G. (2019). Silico-aluminophosphate and alkali-aluminosilicate geopolymers: A comparative review. *Frontiers in Materials*, 6, 106.
- Pouhet, R. (2015). Formulation and durability of metakaolin-based geopolymers (Doctoral dissertation, Université Paul Sabatier-Toulouse III).
- Kim, B., Kang, J., Shin, Y., Yeo, T. M., and Um, W. (2022). Immobilization mechanism of radioactive borate waste in phosphate-based geopolymer waste forms. *Cement and Concrete Research*, 161, 106959.

제7회 방사성폐기물 관리 경진대회 아이디어 및 논문 우수사례집

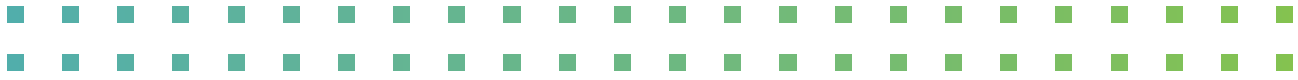
공단 이사장상 - 우수 논문

02

방사성폐기물 효율적 관리 방안

방사선 금속 이온을 제거하기 위한
나노점토의 격자조작 및 나노하이브리드 기법 개발

박종현, 윤채원, Vidya Chandrabose 동국대학교



요약문

본 연구는 현재 방사성 폐기물을 처리하는 다양한 기법에 대한 문헌조사 및 요약에 토대로 하여, 고체 방사성 폐기물에 비해 비교적 연구 성과가 많지 않은 액체 방사성 폐기물을 관리하기 위한 효율적 방안으로서의 흡착제 개발에 초점을 맞추었다. 액체 방사성 폐기물을 처리하는 기법 중에서 점토기반의 흡착제들의 선행 연구들을 소개한 뒤, 새로운 점토 기반 흡착제를 설계하였다. 본 연구에서는 양이온성 점토인 벤토나이트와 음이온성 점토인 금속이중층수산화물에 각각 격자조작 기법과 나노하이브리드화 기법을 적용하여 세습을 제거할 수 있는 고효율 흡착제를 합성하였다. 강한 산 혹은 강한 염기로 처리된 벤토나이트 점토는 층상 적층 구조의 무질서도 증가와 격자 결함 덕분에 세습에 대한 높은 흡착성능을 보였다. 한편, 킬레이트인 구연산 이온이나 에틸렌디아민테트라아세트산과 하이브리드화된 금속이중층수산화물은 점토 표면에 노출된 킬레이트의 능동적인 금속 배위결합으로 인하여 고효율의 세습 제거능을 보였다. 본 연구를 통해 액체 방사성 폐기물의 처리 방법으로서 새로운 흡착제를 제안하고, 효율적인 관리 방안으로서 흡착제를 이용한 흡착과 차폐격리를 제안한다.

목 차

I. 서론

1. 방사선 폐기물의 현황
2. 방사선 폐기물의 일반적 처리방법
 - (1) 고준위 방사능 폐기물 처리방법
 - (2) 중.저 준위 방사능 폐기물 처리방법
3. 흡착제를 이용한 방사능이온 제거방법
 - (1) 이온교환 수지 흡착제를 이용한 방사능 이온 제거 방법
 - (2) 흡착제로 점토를 활용하는 방법
4. 본 논문에서 제안하는 점토 기반 흡착제 개발 전략

II. 본론

5. 실험방법
 - (1) 격자조작 및 나노하이브리드화 적용된 점토 흡착제의 합성
 - (2) 점토 기반 흡착제의 구조 및 화학적 특성 분석
 - (3) 개발된 흡착제의 세습 흡착 성능 평가

III. 결과 및 토의

6. 본 논문에서 개발된 흡착제 분석
 - (1) X선 회절 분석을 통한 구조 분석
 - (2) 적외선분광법에 의한 화학 결합 평가
 - (3) 주사전자현미경 측정을 통한 성상 분석
 - (4) 제타전위 분석을 통한 입자 표면 전하 분석
 - (5) 동적 광산란 분석을 통한 콜로이드 입자 크기 분석
 - (6) Cs⁺ 이온에 대한 각 시료들의 흡착 양상 분석

IV. 결론 및 제언

7. 결론 및 제언

V. 참고문헌

I. 서론

1. 방사선 폐기물의 현황

우리나라 전력발전의 상당 부분은 원자력 발전으로부터 생산된다. 탄소 배출 저감효과와 높은 발전 효율로 인해 각광받아온 원자력 발전소는 최근 일어난 후쿠시마 원전 사고 이후 증가하고 있는 위험 의식과 대량으로 발생하는 방사성 폐기물에 대한 환경 차원의 문제점 등으로 폐로 및 해체 추세에 있다. 효과적인 폐기물 처리 방안에 대한 연구가 필요한 실정이지만 사용 후 핵연료 처분에 관한 사업 시행은 아직 이루어지지 않는 실정이다. 때문에 국가정책은 아직 결정된바 없으나, 원자력증강기연구개발사업의 일환으로 공학적 방벽기술을 개발하여 제한된 심지 층 공간에서의 처분밀도를 증가시켜 그 효과를 입증한바있다. 또한 탄소강 재질과 부식 저항성이 높은 내부식성 재질의 핵연료 처분용기를 개발하여 사용 후 핵연료적제에 따른 안정성을 검증하였다. 또한 완충재의 요오드 흡착능 및 열전달 기능 향상 기술을 확보한 상태이다. [1]

방사성 폐기물에 대한 처리에 있어서는 고체방사성폐기물과 액체방사성폐기물에 대한 처리 기술 및 방안이 동시에 고려되어야 한다. 현재 사용하고 있는 처리방법은 극 저준위 방사성 액체 폐기물의 경우 자연 증발 처리장치를 사용한다. 세탁이나 샤워 폐액 같은 경우 역삼투막 처리를 한다. 또한 열분해 처리설비로 우라늄을 함유한 슬러지 폐기물을 처리하기도 한다. 예측하지 못한 상태로 유출되는 방사성 물질 중 우리에게 큰 피해를 입히는 형태는 수계로 확산되는 액체방사성 물질이다. 2011년 3월 후쿠시마 다이치 원전에서 지진으로 인한 쓰나미가 발생하여 핵 누출 사고가 발생한 바 있는데, 오염된 냉각수로 주변 환경이 높은 수준의 방사 물질로 오염되었다. 이때 누출된 냉각수 안에는 이온상태로 존재하는 특성을 가진 Cs-137이 포함되었는데 이 원소는 반감기가 30년 이상이 되기 때문에 섭취 시 장기간에 걸친 내부 피폭을 유발한다. 이렇게 수중에 이온상태로 존재하는 Cs-137을 제거하기 위하여 여과, 막 분리, 이온교환, 탄소흡착 등의 처리방법이 사용되고 있고, 다양한 반응들이 제안되고 있지만, 대부분의 기법들은 처리에 높은 비용이 요구되므로 수중의 방사성 세습을 제거하기 위한 경제적 기법 개발은 사회적 니즈가 매우 높다. 특히, 흡착에 의한 세습 이온 제거는 간단한 방법이면서도 확실한 세습이온 분리가 가능하여 기초 연구들이 활발히 진행되고 있는데, 경제성이 높은 흡착제로서 이온교환수지, 천연점토광물 등을 개발하는 연구가 활발히 진행 중이다. [2]

2. 방사선 폐기물의 일반적 처리방법

2-1. 고준위 방사능 폐기물 처리방법

방사성 폐기물은 고준위 폐기물과 중·저준위 폐기물로 구분하여 관리한다. 이때 고준위 폐기물은 전량 사용

후 핵연료이다. 고준위 방사성 폐기물의 처분에서 문제가 되는 것은 그 방사능량이 감쇠하기까지 오랜 시간을 필요로 한다는 점이다. 그렇기 때문에 인간의 생활환경에서 폐기물을 장기간 격리해야 할 필요가 있다. 그 방법으로는 우주공간으로의 처분, 남극대륙 등 빙상으로의 처분, 해양저 또는 해양저의 퇴적물로의 처분, 심지 층으로의 처분들이 고려되었다. 지층처분이외의 다른 처분들은 모두 환경조약에 의해 금지되어 있으며, 이는 지층처분이 장기간에 걸쳐 물질의 안정적인 상태를 유지하는 기능이 있고, 자연재해나 인간 활동에 의한 영향이 최소화되기 때문이다. 우리나라에서는 1960년대 이후 구미에서 본격적으로 연구 개발되어 고준위 방사능을 처리하는 가장 유력한 방법으로 고려되었는데, 현재 사용 후 핵연료를 고리, 영광, 울진, 월성에 임시 저장 중이다. 하지만 임시저장 공간이 포화상태가 될 경우 원자력 발전 자체를 멈추어야 하는 실정이기 때문에, [3] 새로운 폐기물 처리 방법들이 요구된다.

2-2. 중·저 준위 방사능 폐기물 처리방법

중·저준위 폐기물은 대부분 원자력 발전소에서 방생한다. 일부는 연구, 의료, 비파괴 검사 등에서도 발생하기도 하는데, 이는 대부분 방사성 동위원소이다. 중준위 폐기물에는 합성수지, 화학적 오니, 방사능에 오염된 물질, 폐로 등이 있는데 이는 대부분 콘크리트나 아스팔트로 굳어서 처리된다. 수명이 짧은 폐기물은 깊이 않은 저장소에 묻히지만 수명이 긴 폐기물은 깊은 지하 시설에 묻히게 된다. 저준위 폐기물에는 폐 필터, 이온교환수지, 작업복 등에서 나오는 방사성폐기물이 이에 해당된다. 얇은 땅에 묻히거나 보통은 압축과 소각을 거친 후 매립된다. 이렇게 매립하는 방식은 위에 언급한 바와 같이 포화상태의 문제에 다다르게 됨과 동시에 지구의 순환시스템에 의해 그 방사능 폐기물의 위험을 사람이 그대로 받게 된다. 공기, 비를 통해 흙에 있던 방사능이 농작물로 이동하고 그것이 식탁에 오르게 되며 결론적으로 사람과 환경에 피해가 간다. [4]

3. 흡착제를 이용한 방사능이온 제거방법

3-1. 이온교환 수지 흡착제를 이용한 방사능 이온 제거 방법

이온교환으로 방사능 이온을 제거할 때 흡착제로 수지라고 하는 반고체 합성물질을 사용한다. 수지는 양이온을 제거하기 위한 산-양이온이나 음이온을 제거하기 위한 알칼리-음이온으로 구성된다. 보통 방사성액체 폐기물에 사용되는 수지는 수소(H⁺)나 수산기(OH⁻)형태이다.[2]

실제로 하나로 일차 정화 계통에 사용되고 있는 수지인 Amberlite Irm 150은 양이온/음이온이 젤로 혼합된 입자로 강력한 양이온과 음이온 교환능력을 가진다. 그리고 이 수지는 마찰과 삼투압 충격에 의한 비드 크랙에 대하여 높은 저항력을 가진다. 수지는 소진되고 나면 교체하거나 재생을 해야 하는데, 수지의 재생은 대량의 원하는 교환이온과 같이 소량의 용액 즉 재생제를 투입하거나 접촉시켜 실행하며, 리튬, 나트륨, 암

모늄, 붕산염과 같은 종류도 사용한다. 이온교환기의 수지 카트리지는 자주 교환 되어야 하는데, 이는 우회 수 중 일부가 수조로 유입되기 전 다시 정화계통을 거치기 때문에 많은 양의 방사선원이 정화 과정에서 수지에 흡착되기 때문이다. 또한 이 카트리지는 1 개월 정도 냉각 시킨 후 인출하여 임시 보관 장소에 옮겨야 할 정도로 방사선량이 높다. 때문에 카트리지를 교환하는 이 작업은 통상적으로 운전원이 원자로 실내에서 하는 작업 중 피폭이 가장 많이 되는 방사선 작업이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 보다 쉽게 회수가 가능한 흡착제가 필요한 실정이다. [2]

3-2. 흡착제로 점토를 활용하는 방법

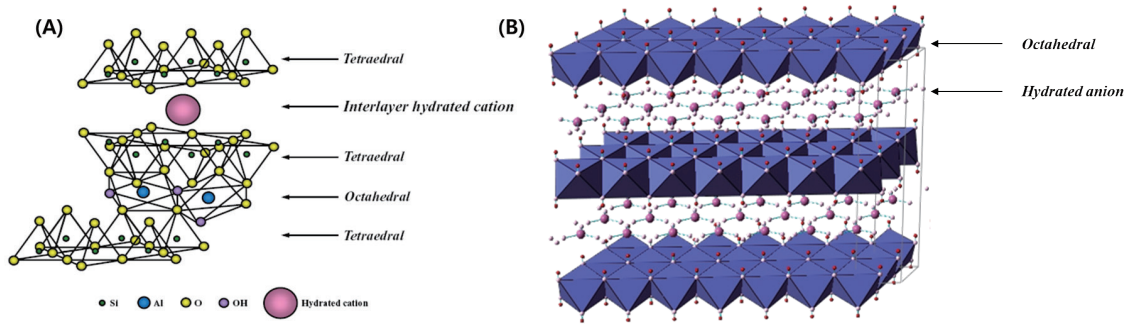
3-2-1. 점토화합물의 화학적 구조 및 방사능 이온 제거 가능성

방사선 폐기물 뿐만 아니라 일반적인 환경오염 물질을 제거하기 위하여 다양한 종류의 흡착제들이 수지 형태 혹은 분말 형태로 연구되고 있다. 특히, 분말 형태의 흡착제는 자성체와의 혼화를 통해 수거의 용이성을 높일 수 있고, 다양한 모양으로 성형될 수 있는 가능성을 가지고 있어 기초 연구로서의 중요성을 갖고 있다. 박리화된 흑연인 그래핀이나 높은 비표면적을 갖는 금속-유기 골격체 등은 높은 흡착 효율로 인하여 연구 차원에서는 각광을 받고 있으나, 제조 방법이 복잡하고, 경제적인 대량생산이 어려워서 자연계에서 얻을 수 있는 광물 기반의 흡착제들이 현재는 더 많은 관심을 얻고 있다.

천연 유래 흡착제 중 가장 널리 이용되는 것이 점토인데, 점토는 화학적으로 금속(수)산화물을 기본 골격으로 하여 층상형 구조나 채널형 구조를 이루고 있어, 나노 수준에서 여러 형태로 변형이 가능하고, 성능을 탑재할 수 있다는 장점이 있다. 그림 1(A)에 도시된 것은 천연 유래 점토 중 하나인 몬트모릴로나이트의 구조인데, 사면체-팔면체-사면체의 층으로 이루어진 알루미늄실리케이트 층이 음전하를 띠고 있고, 층간에 양이온이 정전기적으로 안정화되어 있는 구조이다. 층의 두께가 1nm 전후밖에 되지 않을 만큼 얇고, 층간에 많은 양이온을 담을 수 있어 세슘과 같은 방사선 동위원소 금속이온을 흡착할 수 있다. 다만, 넓은 층상형 구조의 내부에까지 금속이온이 흡착되기가 어렵기 때문에 이론적인 흡착량에 비해 실제 흡착제거능은 낮은 편이다. 점토의 흡착 성능을 증대하기 위하여 다양한 연구자들이 점토의 후처리 반응을 연구하였고, 몇가지 사례를 이어지는 파트에서 요약하였다.

한편, 천연유래 점토 중 음이온성 점토도 존재하는데, 금속수산화물의 팔면체만으로 이루어지는 매우 얇은 층상형 구조가 양전하를 띠고 있고, 이것이 다시 층간의 음이온에 의해 안정화되어 있는 구조를 갖는다 (그림 1(B)). 양이온성 점토와 달리 음이온 교환능을 가지고 있어 금속 원소를 흡착하는 능력은 없으나, 층간 음이온 자리에 킬레이트 음이온을 담지시키면, 킬레이트가 점토 층에 부착된 상태로 다량의 금속 양이온에 배위되어 오히려 높은 양이온 흡착능을 보일 수도 있다.

<그림 1> (A) 양이온성 점토의 일종인 몬트모릴로나이트의 구조, (B) 음이온성 점토인 금속이중층수산화물의 구조>



3-2-2. 흡착제로 점토자체를 이용한 제거방법

액체 방사성폐기물인 방사선 폐수를 효율적으로 처리하는 방법으로서 현재 이온교환이 제일 유용한 기술로 여겨지며 이때 필요한 흡착제는 경제적이고, 안정적으로 공급이 가능하며 친환경적이고 방사성물질을 흡착할 수 있어야 한다. 점토광물은 가격경쟁력이 좋을 뿐만 아니라 입자 표면은 이온들의 불완전한 치환으로 음전하를 띄게 되고 이를 이용하여 양이온을 띄는 방사성원소들을 표면 또는 층간 내에 흡착하거나 가두어 둘 수 있다. [5]

순수한 점토광물은 방사선폐수에 미립자 상태로 사용할 경우 다시 회수하기가 어렵고 2차 오염이 발생 할 수 있는데, 이를 해결하기 위해 알지네이트 용액에 미립자 견운모를 투입하여 알지네이트와 견운모의 비율을 조절한 뒤 고정화시키기 위해 염화 칼슘을 한방울씩 느린 속도로 투입한 흡착제 비드를 만들어 회수 가능한 흡착제를 제조하는 방법이 제안된 바 있다. 이 연구에서, 알지네이트와 견운모의 비율이 9:1일때는 세슘 이온의 흡착 능력은 2.3%, 알지네이트와 견운모의 비율이 7:3일때는 세슘 이온의 흡착 능력은 17.5%, 알지네이트와 견운모의 비율이 5:5일때는 세슘 이온의 흡착 능력은 30.5%, 알지네이트와 견운모의 비율이 3:7일때는 세슘 이온의 흡착 능력은 40.1%, 알지네이트와 견운모의 비율이 2:8일때는 세슘 이온의 흡착 능력은 43.4%, 알지네이트와 견운모의 비율이 1:9일때는 세슘 이온의 흡착 능력은 50.7%로, 가장 높은 세슘 이온 흡착성능은 최종적으로 50.7%로 나타났다. [6] 본 연구에서는 방사선폐수에서 세슘을 흡착하는데 점토광물인 견운모가 능동적인 흡착 자리로서 큰 역할을 한다는 것을 알 수 있다.

호수 등 용량이 고정되어 있지 않은 곳에서 흡착제를 넣었을 때 수표면의 살포에 의존해서는 접촉의 한계가 발생 할 수 있다. 이를 해결하기 위해 점토광물 및 발포제의 함량조절에 의하여 침강속도를 조절함으로써 수평분산성능을 극대화 시키는 방법이 있는데, 한 연구에 따르면 성층은 탄산수소나트륨:시트르산:제올라이트비율을 40:20:40으로 하고, 중층은 탄산수소나트륨:시트르산:제올라이트비율을 29:14:57 비율로 조절할 경우 세슘제거율을 최대 70% 까지 도출 할 수 있었다. 이 특허에 따르면 내부에 수 나노미터의 기공을 많이 가진 제올라이트에 발포제의 함량을 조절하여 침강 속도를 조절함으로써 용량이 고정되어 있지 않은

실제 수중환경의 점토광물의 응용성이 입증되었다. [7]

자성을 가지는 나노입자를 첨가하여 용액 중 분산된 점토를 자석을 이용해 쉽게 회수하는 방법도 보고된 바 있다. 코어-셸 이온, 셸-폴리고분자인 코어셸 구조인 양전하성 자성 나노입자를 음전하성점토인 나트륨베네사이트에 전위차에 의한 층상자기조립을 통해 부착시킨다. 나트륨베네사이트는 음전하성 이중층의 층상 점토광물이기 때문에 상기이중층의 간격 안에 세습을 담지 하게 된다. 중성 환경인 pH7에서 제거 효율이 가장 우수한 결과를 보였다, 키네틱 실험결과 10분 이내에 흡착평형으로 도달하는 것으로 보아 매우 빠른 흡착능을 보임을 확인했다. Q_{max} (최대흡착량) 값은 100mg/g이다. 본 발명에선 높은 표면적을 가진 점토광물에 자성입자를 함유하여 세습을 제거한 후 손쉽게 회수될 수 있도록 하였으며, 역시 점토 광물이 갖는 경제적이고 우수한 양이온 흡착능을 이용한 연구로 볼 수 있다. [8]

3-2-3. 흡착제로 산 또는 염기 처리한 점토를 이용한 제거방법

방사성 물질제거로 각광받는 물질 중 하나는 몬트모릴로나이트 계열의 점토를 다량 함유하고 있는 벤토나이트 광물인데, 흡착능을 활성화하기 위하여 알칼리성 혹은 산처리방법이 제안되었다. 산성 처리에 의해서는 벤토나이트 층간에 존재하는 치환성양이온(K^+ , Na^+ , Ca^{+} 등)을 수소이온으로 교환하여 층상 적층 구조를 교란하고 외부 양이온의 접근을 용이하게 할 수 있다. 예컨대, 염산으로 산처리한 벤토나이트는 순수한 벤토나이트에 비해 비표면적 증가, 기공사이즈 감소로 Cs^{+} 흡착능이 증가 한다고 보고되었다. [9] 어떤 연구에서는 벤토나이트의 세습 흡착능은 산처리 전 70%에서 산처리후 87~90%로 급격히 늘어났다고 한다. 특히, 흡착 환경의 pH가 증가함에 따라 세습제거율이 급격히 증가하여 Q_{max} (최대흡착량)=12.8mg/g 의 높은 흡착능을 보였다고 보고되었다. 이 연구에 따르면 벤토나이트를 산처리하면 미세기공과 중간세공을 모두 갖게 되며, 팔면체판이 붕괴되며 두 개의 사면체판의 두 면이 표면으로 노출되며 표면적이 증가하기 때문에 세습흡착능이 증가한다고 한다. [10]

또 다른 방법으로는 천연백토를 6M의 진한 황산에 분산하고 80°C에서 6시간 가열하여 활성화한 것인데, 산 처리에 따라 표면의 산성도를 증가되고, 활성부위와 기공의 부피, 비표면적이 증가하기 때문에 흡착능이 증가하였다고 보고되었다. 산활성 점토의 처리량을 0.5 g부터 5.0 g까지 증가하였을 때의 Cs^{+} 의 흡착 효율은 서서히 증가하여 97.14% 에 이르렀다. 초기 Cs^{+} 농도를 25ppm에서 100ppm까지 증가시키기에 따라 산활성 점토의 Cs^{+} 흡착 효율은 96.88%에서 87.27%로 다소 낮아졌지만, 여전히 산에 의한 세습 흡착 활성도가 높음을 알 수 있다. [11]

흡착제로 염기 처리한 점토를 이용한 방법 또한 제안되고 있는데, 고상으로 염기 처리된 몬트릴로나이트는 세습흡착능이 Q_{max} (최대흡착량)=290.70mg/g으로 처리 전 몬모릴로나이트가 Q_{max} (최대흡착량)=136.99mg/g인 것에 비하여 2배 이상의 활성도 증가를 보였다. 특히, 다량의 경쟁이온이 존재하는 지하

수 조건에서도 세슘을 선택적으로 제거하는 우수한 성능을 나타내는 것이 보고되어, 염기 처리만으로도 점토의 세슘 흡착능이 향상될 수 있음을 시사하였다. 이 특허에 따르면 점토광물과 알칼리 수산화물의 고체상의 간단한 염기 반응으로 비표면적이 늘어나면서 세슘에 대한 흡착 용량이 크게 상승하였고 이에 따라 세슘의 제거 효율을 향상시킬 수 있음을 확인하였다. [12]

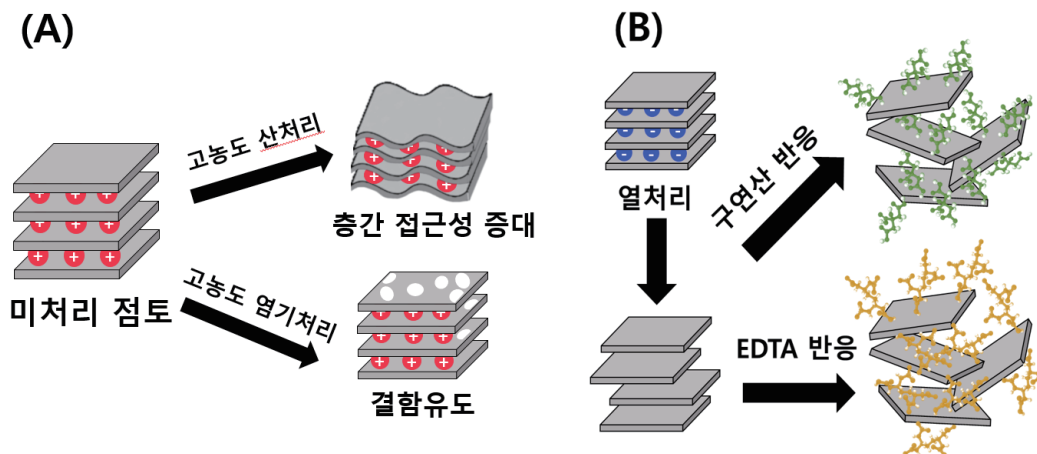
3-2-4. 점토를 흡착 플랫폼으로 활용하는 방법

점토가 갖는 본연의 양이온 교환능을 활용하는 방법, 그리고 그 활성도를 산/염기 처리로 증대시키는 방법 외에도 점토를 흡착의 플랫폼으로 하여 고정체 역할을 부여하고, 다른 물질을 이용하여 양이온을 흡착할 수도 있다. 양이온성 계면활성제를 이용해 표면전하를 음에서 양으로 개질한 벤토나이트와 알지네이트, 프러시안블루를 층상 적층 방법으로 비드화한 연구가 보고된 바 있는데, 이때 세슘을 흡착하는 능동적 물질은 프러시안 블루이고, 벤토나이트는 알지네이트와 프러시안 블루를 연결시켜주는 플랫폼 역할을 수행한다. [13] 위와 비슷한 방식으로 일라이트 점토에 NaCl전처리를 하여 카르복실기의 음전하를 극대화시켜 프러시안블루의 함량을 증가시켜 점토를 흡착 플랫폼으로 활용한 연구가 보고된 바도 있다. [14] 이는 점토광물이 반대의 전하를 흡착시키는 물질을 고정시키는 플랫폼 역할을 하여 시너지효과를 낼 수 있음을 보여준다.

4. 본 논문에서 제안하는 점토 기반 흡착제 개발 전략

상술한 바와 같이 천연 유래의 점토는 나노수준에서의 격자 조작 및 하이브리드화 반응과 같은 후처리를 통해 흡착 성능을 조절할 수 있고, 대량 생산에서의 경제성 덕분에 방사선 금속 양이온 제거제로서의 가능성이 높다. 다만, 여타의 합성 흡착제에 비해 흡착양이나 흡착 효율, 흡착된 상태의 열역학적 안정성 등이 다소 낮은 면이 있어 다양한 방법의 후처리가 필요하다.

<그림 2> 본 연구에서 사용한 점토 흡착제 개발을 위한 나노격자 조작 및 하이브리드화 기법에 대한 모식도 (A) 양이온성 점토를 이용한 산처리 및 염기 처리 (B) 음이온성 점토에 대한 킬레이트 고정화



본 연구에서는 점토의 나노구조를 변화하여 세슘 양이온에 대한 친화력을 극대화시키는 방법을 제안하고자 하는데, 양이온성 점토인 몬트모릴로나이트, 음이온성 점토인 금속이중층수산화물에 각각 후처리를 통해 흡착효율을 높이려고 한다. 그림 2(A)에서 나타난 바와 마찬가지로, 고농도의 산처리를 통해 층간 양이온을 수소이온으로 치환함으로써 층상 적층 구조의 무질서도를 높이고 세슘 양이온의 층간 접근을 높이는 전략과 고농도의 염기처리를 통해 결합을 유도함으로써 층간 공간 뿐 아니라 층상 구조 자체에도 세슘을 흡착할 수 있는 기능을 부여하고자 하였다. 이 방법은 기존에도 많이 이용되는 방법이지만, 본 연구에서는 반복 산처리 혹은 고농도 염기처리를 활용하여 나노격자 조작을 세밀하게 수행하는 점에서 기존 연구와의 차별을 두기로 하였다. 한편, 금속이중층수산화물은 킬레이트를 고정하는 플랫폼으로 활용할 수 있는데, 그림 2(B)에서 나타난 바와 마찬가지로 열처리 후 재건 반응을 통해 무질서하게 쌓인 층상 구조 사이사이에 킬레이트를 다수 고정시킬 수 있다. 본 연구에서는 킬레이트로서의 효율이 입증된 에틸렌디아민테트라아세트산(EDTA) 뿐만 아니라 값싸고, 음이온 밀도가 높은 구연산을 킬레이트로 사용하여 금속이중층수산화물에 고정시키는 전략을 적용하였다.

본 연구에서는 상기와 같은 전략으로 마련된 총 4종의 나노격자 조작 및 하이브리드화 점토의 화학적 구조와 현미경적 구조를 분석하는 한편, 수분산에서의 콜로이드 성질을 분석하여 금속 양이온 흡착제로서의 활용 가능성을 예측하고, 이에 더하여 세슘 양이온에 대한 흡착 실험을 수행하여 기존 흡착제에 비해 개선된 점을 설명하고자 한다.

II. 본 론

5. 실험방법

5-1. 격자조작 및 나노하이브리드화 적용된 점토 흡착제의 합성

벤토나이트(BEN)은 한국지질자원연구원으로부터 제공받았으며, 금속이중층수산화물(LDH)는 단석산업에서 샘플 형태로 제공받았다. 세습 흡착성능을 높이기 위하여 BEN과 LDH에 각각 다음과 같은 2가지 처리를 수행하였다.

산처리 벤토나이트(A-BEN)을 제조하기 위하여 BEN 분말 10g을 1 mol/L 농도를 갖는 1 L의 염산(HCl)에 조심스럽게 첨가하여 분산한 후, 300rpm으로 24h 동안 교반하였다. 24시간 후 감압여과를 통해 상층액을 제거하고, 젖은 상태의 벤토나이트 침전물을 다시 한번 1 mol/L 염산 1 L에 분산하여 24시간동안 교반하였다. 한편 염기처리 벤토나이트(B-BEN) 제조를 위해서는 벤토나이트 분말 10 g을 1 mol/L의 수산화소듐(NaOH) 용액 1 L에 분산한 후 300 rpm에서 24시간 동안 교반하였다. 각각의 반응이 종료된 후 감압여과를 통해 상층액을 제거하였고, 반응에 참여하지 않은 염산 혹은 수산화소듐을 제거하기 위하여 증류수로 여러 번 세척하였다. 젖은 상태의 침전물은 80도 진공오븐에서 24시간동안 건조한 후, 마노 유발을 이용하여 미세 분말로 마쇄하였다.

킬레이트 처리된 금속이중층수산화물을 제조하기 위해서는 다음과 같은 실험을 수행하였다. 우선 금속이중층수산화물 분말 5 g을 알루미늄 보트에 고르게 펼쳐 넣은 후 머플형 전기로에 넣고 500°C에서 6시간 동안 하소하였다. 열처리 후 얻은 금속산화물은 각각 에틸렌디아민테트라아세트이트(EDTA) 혹은 구연산(citrate: Cit) 킬레이트와 반응시켰다. 킬레이트 용액으로는 EDTA 1.2 g을 증류수 100 mL에 용해한 것과 6 g 구연산을 증류수 100 mL에 용해한 것을 사용하였다. 각각의 킬레이트 용액에 열처리된 금속산화물 분말 1 g을 분산하여 24 시간동안 충분히 교반하여 재건 반응을 유도하였다. 반응 후 감압여과를 통해 침전물을 분리하였고, 반응에 참여하지 않은 이온을 제거하기 위하여 증류수로 수차례 세척하였다. 젖은 상태의 침전물은 80도 진공오븐에서 24시간동안 건조한 후, 마노 유발을 이용하여 미세 분말로 마쇄하였다. EDTA와 구연산 각각이 고정된 금속이중층수산화물은 EDTA-LDH와 Cit-LDH로 명명하였다.

5-2. 점토 기반 흡착제의 구조 및 화학적 특성 분석

흡착제의 특성을 분석하기 위해 다양한 분석을 진행하였다. 분말상태의 흡착제를 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM, JEOL, JSM-7100F, Japan) 측정분석을 진행하였고, 마찬가지로 분말 상태의 흡착제로 X선 회절(X-ray diffraction, Rigaku, Ultima IV, Japan) 분석을 진행하였다. 적외선분

광법 (Fourier transform infrared spectroscopy, JASCO, FT/IR-4600, Japan) 측정 역시 분말 상태의 흡착제를 바로 이용했으며 ATR모드에서 측정범위는 500cm^{-1} 부터 4000cm^{-1} , 분해능은 4cm^{-1} 이다. 동적 광산란 (Dynamic light scattering, DLS)법 분석과 제타전위 측정 (Zeta Potential, Photal Otsuka Electronics, ELSZ-1000, Japan) 분석은 동일 기기로 진행하였으며, 희석액을 이용하여 측정하였다. 시료 0.001g을 20ml의 증류수에 희석하고 섞은 뒤, 초음파 교반기를 이용해 30분동안 교반하였다. 모든 샘플은 25°C 조건에서, 희석제로는 증류수를 사용하였다.

5-3. 개발된 흡착제의 세습 흡착 성능 평가

화학적 처리 전의 점토 2종 (BEN, LDH)와 처리 후 점토 4종 (A-BEN, B-BEN, EDTA-LDH, Cit-LDH)의 Cs 흡착 능력을 평가하기 위해서는 4가지 서로 다른 Cs 농도에서 각 물질의 흡착능을 평가하였다. Sigma-Aldrich사로부터 구매한 99.9% 순도의 CsCl 시약을 증류수에 용해하여 2000, 200, 20, 2 ppm의 CsCl 용액을 제조하였다. 한편, 6종의 점토 시료는 2 mg/mL 농도로 증류수에 분산하였다. CsCl 용액 1 mL와 과점토 분산액 1 mL를 혼합한 후 항온 인큐베이터를 사용하여 상온 조건에서 24시간 동안 교반하였다. 흡착 반응이 종료된 반응액은 원심분리를 통하여 고형분을 1차 제거하고, $0.22\text{ }\mu\text{m}$ 포어 크기를 갖는 교체형 주사기 필터를 이용하여 2차 제거하여 상층액을 확보하였다. 흡착 전후의 농도 변화는 유도결합플라즈마-질량분석(inductively coupled plasma-mass spectroscopy; Agilent 7900)을 통해 확인하였다. 흡착 성능을 판단하기 위해서는 흡착능 (Q_e)와 흡착효율(%)의 두가지 지표를 아래의 산식을 통해 계산하였다.

$$\text{흡착능}(Q_e(\text{mg/g})) = \frac{(\text{흡착 전 Cs 질량}(\text{mg})) - (\text{흡착 후 남은 Cs 질량}(\text{mg}))}{\text{흡착 반응에 사용된 점토 질량}(\text{g})}$$

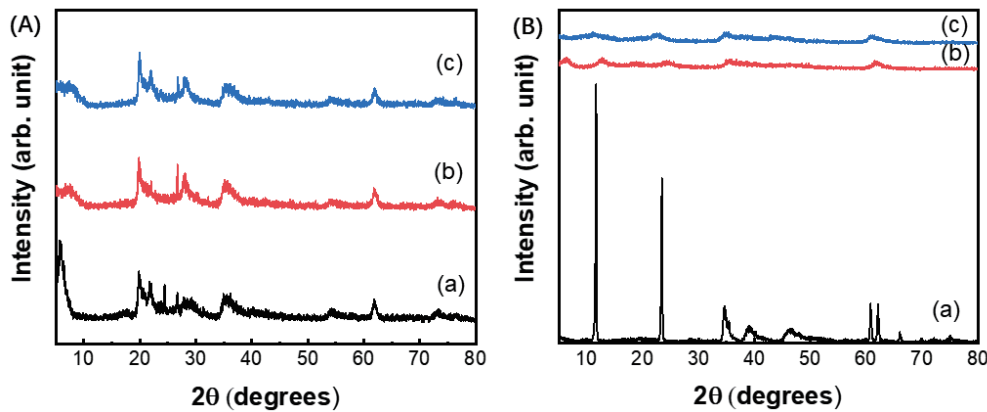
$$\text{흡착효율}(\%) = \frac{\text{흡착된 Cs 질량}}{\text{흡착 전 Cs 질량}} \times 100$$

III. 결과 및 토의

6. 본 논문에서 제작된 흡착제 6종의 분석

6-1. X선 회절 분석을 통한 구조 분석

<그림 3 > 분말 X-선 회절 패턴 (A) BEN 계열 (a) BEN, (b) B-BEN, (c) A-BEN, (B) LDH 계열 (a) LDH, (b) EDTA-LDH, (c) Cit-LDH



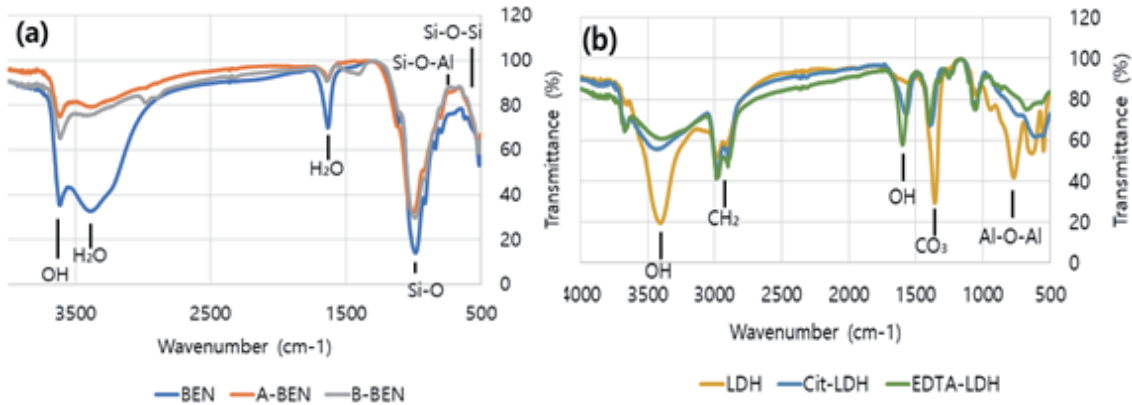
합성된 시료의 구조를 분석하기 위하여 분말 X-선 회절 패턴을 관찰하였다. 벤토나이트의 경우에는 산이나 염기 처리 전후 회절 패턴에서의 큰 변화는 확인할 수 없었다. 특히 20도 이후에서 나타나는 격자 피크는 산/염기 처리 유무와 관련 없이 거의 일정한 것을 알 수 있는데, 이는 벤토나이트의 격자가 산이나 염기 처리에 의해 심각하게 용해되거나 분해되지 않았음을 의미한다. 두드러지는 특징으로는 층상 적층구조의 면간격을 나타내는 (001) 피크인데, BEN에서 5도 근처에서 나타나는 이 피크는 산이나 염기 처리 이후 크기가 급격히 줄어들고, 피크의 위치도 고각으로 약간 이동하였다. 이는 층상 적층 구조의 무질서도가 증가하였다는 것을 나타내는데, 벤토나이트 적층 구조의 변화는 양이온 접근을 용이하게 하기 때문에 금속 양이온 제거에 긍정적인 효과를 가져 올 것으로 기대된다.

한편, LDH의 경우 킬레이트 반응 후에 급격한 회절 패턴의 변화를 나타내는데, 이 또한 설계한 대로 킬레이트 부착의 결과인 것으로 해석된다. 재건 반응 전의 LDH는 30도 이전에 나타나는 매우 날카로운 피크들과 30도 이후의 영역에서 나타나는 비대칭 피크로 나타내는데 이는 각각 LDH의 층상 적층구조와 터보스트라이트 적층 구조를 나타낸다. 킬레이트 반응 후에는 모든 피크의 크기가 대폭 감소하고, 특히 30도 미만의 적층 피크가 거의 사라지는 것을 볼 수 있는데, 이는 킬레이트 분자들이 재건 과정에서 층간 공간 혹은 층의 외부에 부착되면서 부착 무질서도가 늘어났기 때문이다. 이러한 적층의 무질서도 증가는 비표면적의 증대로 귀결될 것이며, 표면에 노출된 다수의 킬레이트 분자들은 능동적으로 금속 양이온을 흡착하여 고정하는

역할을 할 것으로 예상된다.

6-2. 적외선분광법에 의한 화학 결합 평가

<그림 4> FT-IR 측정 결과 (a) BEN 계열, (b) LDH 계열



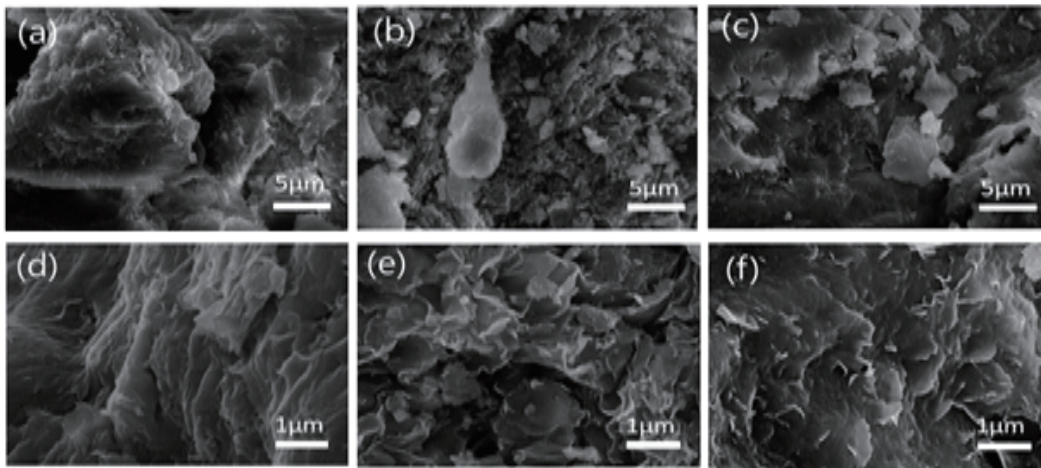
제조된 흡착제 내의 관능기를 분석하기 위하여 적외선분광(Fourier transform infrared spectroscopy) 측정을 수행하였다. BEN계열을 살펴보면 3450cm^{-1} 부근의 H_2O 피크는 산이나 염기 처리 이후 크게 줄어들었으나, 밴드의 에너지 이동은 보이지 않았다. 에너지 이동은 진동여부와 상관있는데, 이러한 이동이 없었던 것은 각 진동을 나타내는 화학 결합의 주변 환경이 크게 변화하지 않았다는 것을 의미한다. BEN 계열 시료에서 관찰된 적외선 흡광 피크는 3620cm^{-1} 부근의 물 분자의 O-H 신축진동, 1650cm^{-1} 부근의 물 분자의 O-H 진동, 1000cm^{-1} 부근의 Si-O 피크, 950cm^{-1} 부근에서 관찰되는 Al-OH, 500cm^{-1} 부근의 Si-O-Al와 450cm^{-1} 부근에서 관찰되는 Si-O-Si 피크로서 [15], 모두 벤토나이트 광물이 원래 갖고 있는 화학적 성질이 유지되었음을 보여준다. 3500cm^{-1} 근처의 물 관련 피크가 산/염기 처리 후에 줄어든 것은 시료의 건조 상태와 관련 있기 때문에 화학적 성질의 변화로 보기는 힘들며, 시료의 상태 변화를 나타내지 않는다고 판단하였다.

다음으로 LDH 및 킬레이트 처리된 LDH 시료의 FT-IR 측정결과는 다음과 같았다. 특징적인 피크로는 3450cm^{-1} 근처에서의 -OH 피크 (금속에 결합된 수산화기), 2900cm^{-1} 근처의 두 개의 - CH_2 피크(표면에 존재하는 유기물 혹은 킬레이트에서 기인)이다. 1620cm^{-1} 이하 에너지대의 피크들은 처리 전 LDH와 킬레이트 처리 이후의 LDH들과의 차이를 극명하게 보여주는데, 1620cm^{-1} 부근의 O-H는 처리 이후의 LDH들에서만 피크가 높은 것을 볼 수 있었다. 반면에 1400cm^{-1} 부근의 CO_3^{2-} 피크는 LDH 측정시에는 높은 비율을 가지고 있는 것으로 보이다가 처리후의 Cit-LDH나 EDTA-LDH에서는 다른 피크들과 비중이 비슷해지며 약한 모습을 보여주는데, 이는 원래 층간에 존재하던 탄산 이온이 킬레이트 처리 이후 킬레이트 이온으로 치환되었음을 나타낸다. 600cm^{-1} - 700cm^{-1} 근처에서 보이는 피크들은 Al-O와 Mg-O로부터 기인되는

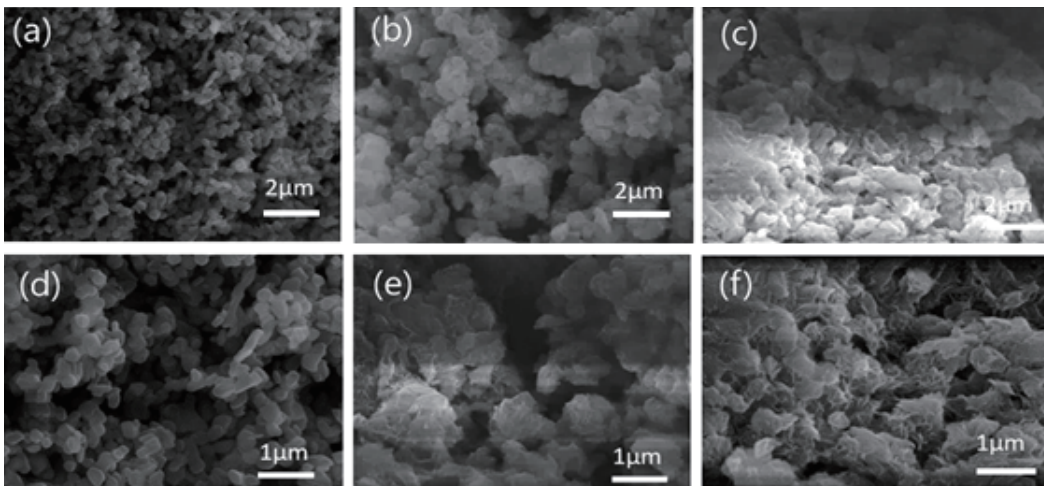
피크인데 [16], 킬레이트 처리 후 LDH에서는 피크가 작아지는 현상을 보였다. 이는 킬레이트 처리 시 수행하는 재건법 과정에서 LDH의 층상 구조 결정성이 일부 상실되어 나타나는 현상으로, 당초 계획하였던 대로 결정성은 낮아지면서 비표면적이 높아지고 킬레이트 자리들이 대거 노출되는 결과를 초래할 것으로 판단된다.

6-3. 주사전자현미경 측정을 통한 성상 분석

<그림 5> 산/염기 처리 전/후 벤토나이트의 주사전자현미경 영상 (a, d) BEN (b, e) A-BEN (c, f) B-BEN



<그림 6> LDH SEM(고배율) (a),(d) LDH (b),(e) EDTA-LDH (c),(f) Cit-LDH



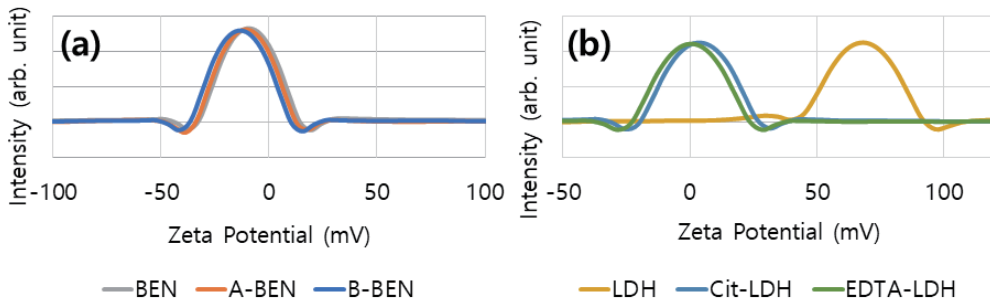
화학적 처리 전후 벤토나이트와 LDH의 성상 변화를 확인하기 위하여 주사전자현미경을 측정하였다. 기존 문헌에 보고된 바와 마찬가지로 BEN의 전자현미경 영상은 층상형 물질이 적층되어 큰 덩어리를 이룬 모습으로 보이고 있다. [17] 산이나 염기가 처리된 벤토나이트(A-BEN과 B-BEN)은 적층구조의 층상 성상이 좀 더 무질서하게 배열되어 있는 형태로 변화된 것을 확인 할 수 있었다. 층상 성상이 굴곡이 더 많아졌다는 것은 산이나 염기 처리에 의하여 층간 적층 상태의 무질서도가 높아졌거나, 결정성이 낮아졌다는 것을 시사한

다. 이는 기존에 보고된 바와 마찬가지로 [18], 산이나 염기 처리에 따라 벤토나이트 점토의 비표면적이 넓어지고, 흡착할 수 있는 자리가 늘어났다는 점을 시사한다. 한편, 산 처리(A-BEN)와 염기 처리(B-BEN) 사이에서는 큰 차이점을 볼 수 없는데, 이는 주사전자현미경 측정만으로는 나노수준의 격자 조작 정도를 확인하기 어렵기 때문이다.

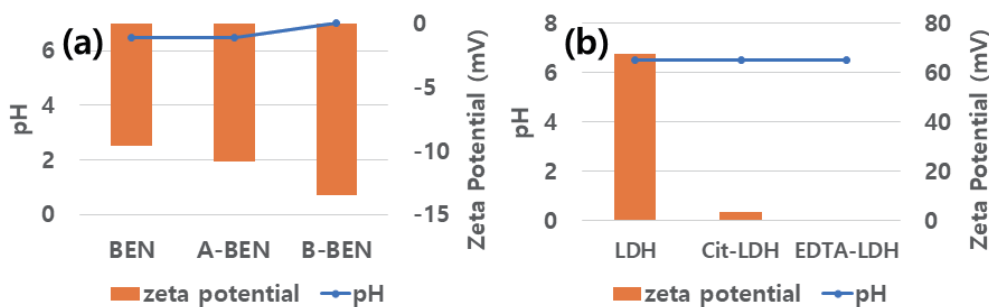
벤토나이트 시료들에서 보인 것과 유사하게, LDH 또한 킬레이트 처리 후 전자현미경 영상에서 큰 변화를 보였다. 처리 전의 LDH는 기존 문헌에서 보고된 바와 마찬가지로 [19], 수백 nm 크기의 구형 입자들로 이루어져 있었다. 재건법을 이용하여 EDTA나 구연산으로 개질된 LDH는 얇은 층상형 성상들이 뭉쳐서 군집을 이룬 모래장미 형상을 띠고 있었다. 이는 재건법을 통해 유기물과 하이브리드화한 LDH에서 자주 발견되는 양상인데, [20] 이러한 성상을 통해 비표면적이 극대화될 수 있으며, LDH 층에부착된 킬레이트들이 최대의 외부로 노출되어 금속 원소에 대한 높은 흡착 성능을 보일 수 있다. 형성한 것을 알 수 있다. 저배율의 EDTA-LDH와 Cit-LDH의 영상을 비교해보면, EDTA는 좀더 둥글게 입자를 형성하는 모습을 보이는 반면, Cit-LDH는 특정하기 어려운 군집체로 뭉쳐서 모여 있는 모습을 확인 할 수 있다. 이러한 성상 차이는 추후 금속 원소에 대한 흡착 제거능에 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단된다.

6-4. 제타전위(Zeta potential) 분석을 통한 입자 표면 전하 분석

<그림 7> 제타전위 측정 결과 (a) BEN 계열, (b) LDH 계열



<그림 8> PH대비 제타전위 (a) BEN 계열, (b) LDH 계열

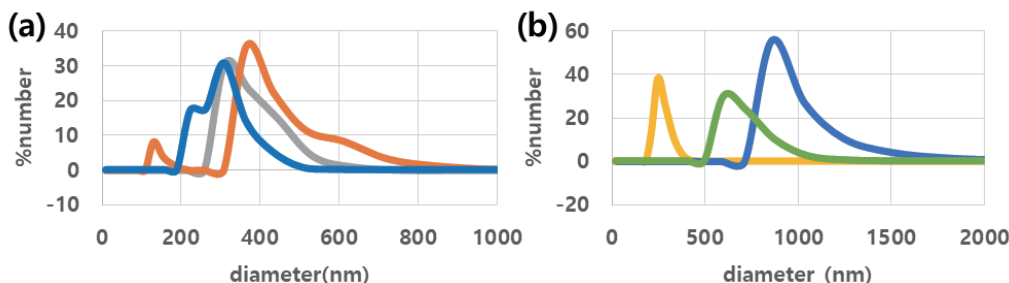


화학적 처리에 의한 입자 표면 전하 변화를 판단하고, 수분산에서의 콜로이드 안정성을 예측하기 위해 제타

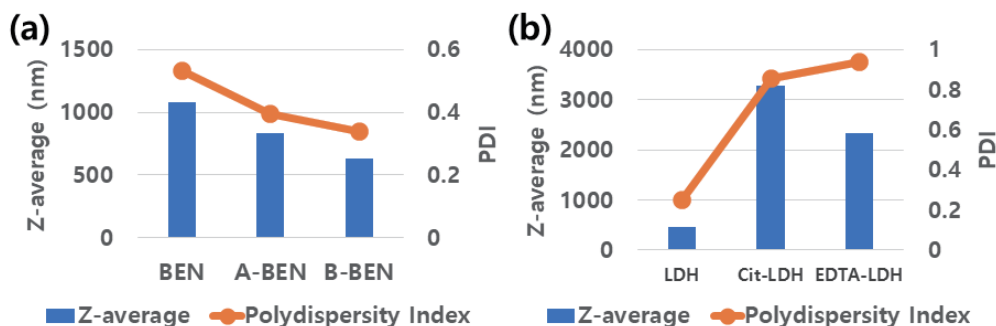
전위 분석을 수행하였다. 벤토나이트의 표면전하는 산/염기 처리 전후 -9.59mV (BEN) -10.85mV (A-BEN) -13.46mV (B-BEN)로 큰 변화가 없었다. 벤토나이트는 양이온성 점토로 층자체는 음전하로 하전되어 있기 때문에 [21] 음의 표면전하를 띠는 것이 타당하다. 산이나 염기 처리 후 제타 전위에 큰 변화가 없었다는 점은 처리 후 벤토나이트 층의 배열에만 변화가 생겼고, 나노층의 화학적 성질에는 변화가 없었음을 나타낸다. 반면, LDH의 제타전위는 67.80mV 에서 킬레이트 처리 후 3.68mV (Cit-LDH), 0.24mV (EDTA-LDH)로 대폭 감소하는 양상을 보였다. LDH는 음이온성 점토로서 [22] 층 자체는 양전하를 띠는 것이 타당한데, 킬레이트 부착 후 양의 제타 전위가 상쇄되는 것은 표면이 음전하로 둘러싸여 전하가 상쇄되는 효과가 일어났기 때문이다. 이 결과를 통해 킬레이트로 반응시킨 EDTA나 구연산 분자가 LDH 표면에서 노출된 상태로 존재함을 알 수 있다. 흡착제의 표면에 금속 양이온이 이끌려 와서 흡착되어야 한다는 점을 생각할 때, 음의 표면전하를 갖는 벤토나이트나 산/염기 처리된 벤토나이트는 높은 양이온 친화력을 갖고 있다고 판단된다. 이와는 반대로 LDH 시료들은 대체로 양의 표면전하를 갖기 때문에 양이온과의 친화력 면에서는 성능이 떨어질 수 있으나, 표면에 노출된 킬레이트들이 능동적으로 금속이온을 고정시킬 수 있으므로, 단순 흡착 이상의 금속 제거능을 보일 수 있을 것으로 예상된다.

6-5. 동적 광산란 분석을 통한 콜로이드 입자 크기 분석

<그림 9> 수력학적 입자 크기의 분포도 (a) BEN 계열, (b) LDH 계열



<그림 10> 입자의 평균 수력학적 크기 및 다분산도(polydispersity index: PDI)값 (a) BEN 계열, (b) LDH 계열



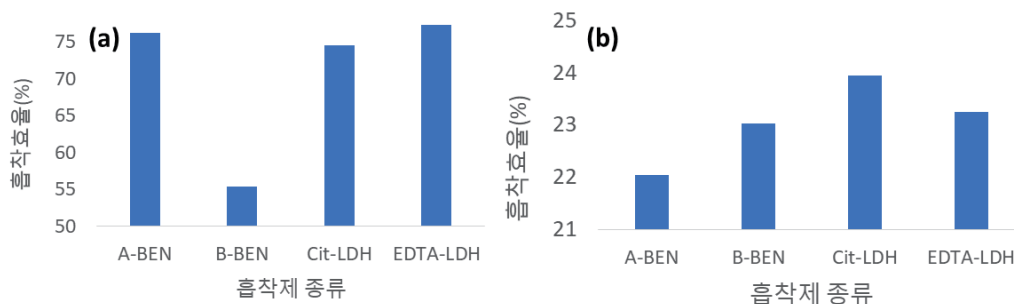
수용액상에서의 금속 이온을 제거하기 위해서는 흡착제가 수분산에서 최대한 작은 입자 크기로 균일하게

존재하는 것이 유리한데, 흡착제 입자의 수력학적 크기를 확인하기 위하여 동적 광산란 분석을 시행하였다. <그림 9>의 입자 분포를 보면 벤토나이트 계열은 산이나 염기 처리 후 전반적으로 입자 분포가 근소하게 변화하는 양상을 보였는데, 평균 입자 크기를 확인하면 BEN, A-BEN, B-BEN이 각각 1084.8nm, 831.4nm, 632.9nm 로 산이나 염기 처리 후 크기가 줄어들고, 다분산성(polydispersity index: PDI)이 BEN, A-BEN, B-BEN이 각각 0.533, 0.396, 0.339로 줄어들어<그림 10> 균일성이 커지는 것을 알 수 있다. 이 결과를 토대로 예상하며, 산이나 염기 처리 후 벤토나이트의 입자는 크기가 작고 균일해 져서 금속 이온 흡착의 효율이 좋을 것으로 판단되며, 균일도가 높아지는 B-BEN이 A-BEN보다 조금 더 높은 흡착 능력을 보일 것이라고 예상된다.

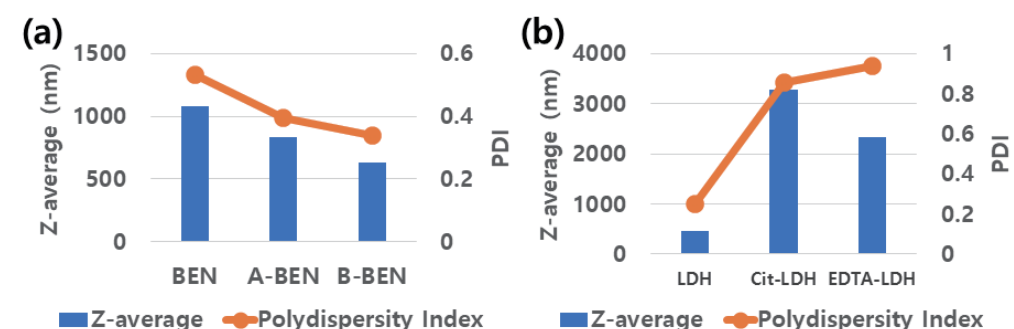
LDH 계열 시료들의 수력학적 크기는 <그림 9>의 (b)에서 볼 수 있듯, 킬레이트 고정 후 다소 커지는 양상을 보이고 있다. 평균 입자 크기 기준으로 볼 때 LDH, Cit-LDH, EDTA-LDH는 각각 464.4nm, 3275.6nm, 2334nm 를 갖고 있어, 킬레이트 처리에 의한 응집체 형성이 예상되며, 다분산도 또한 LDH, Cit-LDH, EDTA-LDH에서 0.249, 0.856, 0.939의 값을 갖고 있어, 입자 크기의 균일성이 떨어지는 것으로 보인다. 단순히 입자 크기와 균일도 입장에서는 킬레이트를 부착한 LDH의 성능이 떨어질 것으로 예상할 수 있지만, 입자의 균일성 외에도 LDH에는 표면에 노출된 킬레이트의 능동적 금속 제거 기능을 기대할 수 있기 때문에 측정된 수력학적 입도와 다분산도는 심각한 수준은 아닌 것으로 판단된다.

6-6. Cs⁺ 이온에 대한 각 시료들의 흡착 양상 분석

<그림 11> 흡착제에 따른 세슘 흡착효율 (a) 10ppm, (b) 1000ppm



<그림 12> 흡착제에 따른 흡착량 (Qe: mg/g) 값 (a) 10ppm, (b) 1000ppm



4종의 흡착제에 대한 Cs 양이온 흡착은 유도결합 플라즈마 질량 분석을 통해 정량하였으며, 그 결과는 다음과 같았다. 저농도(10 ppm)와 고농도(1000 ppm) 세습 용액에서의 흡착량(mg/g)과 흡착효율(%)는 흡착제 별로 다소 다른 양상을 보였다. <그림 11>에서 관측 할 수 있듯, 저농도에서 각각의 흡착효율은 A-BEN이 76.2(%), B-BEN이 55.4(%), Cit-LDH가 74.5(%), EDTA-LDH가 77.3(%)로 나타났으며 EDTA-LDH > A-BEN > Cit-LDH > B-BEN 순으로 흡착 성능이 좋았다. 고농도 에서의 흡착효율은 A-BEN이 22.0(%), B-BEN이 23.0(%), Cit-LDH가 24.0(%), EDTA-LDH가 23.3(%)로 나타났으며 Cit-LDH > EDTA-LDH > B-BEN > A-BEN 순으로 성능이 좋았다.

같은 종류의 점토로 비교해 봤을 때, 133ppm(1mM)에 해당되는 CsCl 수용액에 고액비 1:20의 흡착제를 사용 했을 경우에 하이드로바이트, 몬모릴나이트, 일라이트, 카올리나이트 모두 흡착량은 3mg이하로, 흡착효율 또한 흡착량이 가장 높았던 하이드로바이트 기준으로 0.3326mg/g 이었던 것을 감안한다면 단일 점토 사용보다 뛰어난 성능을 보여준다. [23] 앞서 흡착제로 점토 자체를 이용한 제거방법에서 소개 되었던, 알지네이트와 견운모의 혼합중에서도 가장 Q_{max}값이 높았던 1:9일때도 Q_{max}값이 50.7%였기 때문에 훨씬 우수한 성능을 보여준다고 할 수 있다. [6] 전반적으로 LDH계열이 벤토나이트 계열보다 더 좋은 흡착 성능을 보여주었으며 저농도에서는 EDTA-LDH의 성능이, 고농도에서는 Cit-LDH 성능이 가장 우수하다고 여겨진다.

기본적인 벤토나이트만으로도 흡착능력이 존재하나, 산처리와 염기처리를 통해서 흡착능력이 강화 된 것을 알 수 있었다. LDH 계열은 기본적으로 양이온 흡착능력이 없지만, Cs가 3개의 주개원자를 가진 구연산 이온이나 6개의 주개원자를 가진 EDTA와의 킬레이트 결합을 통해 잘 흡착되는 성질을 가지게 해 주었다.

IV. 결론 및 제언

본 연구는 방사선 폐기물의 일반적 처리방법을 알아보고, 고체방사성폐기물에 비해 연구가 덜 이루어진 액체방사성폐기물에 초점을 맞추어 진행하였다. 먼저 점토기반의 흡착제들의 선행연구들을 소개한 뒤, 새로운 기반의 처리 기술 및 방안을 제안하였으며 이때 제안된 흡착제는 점토기반에 산처리와 염기처리를 하거나 LDH에 킬레이트제의 물질을 혼합해 만든 흡착제를 이용한 방사능이온 제거방법을 이용하였다.

본 실험에서는 수용액에서 Cs이온의 흡착 효율을 증대시키는 방안을 비교 연구 하였다. 산처리, 염기처리된 벤토나이트와 합성된 LDH는 X-선 회절 분석, 적외선 분광 분석, 주사전자현미경, 제타전위 분석 및 동적광산란 분석을 통해 안정성 분석과 층간의 간격 변화, 표면적의 변화 등을 가시적으로 확인 할 수 있었다. BEN계열은 처리후에 표면적이 증가하였으며, 매질에 분산되었을 때의 군집의 크기가 줄어들었음을 LDH 계열은 반대로 군집의 크기가 증가하였으며, 킬레이트로 반응시킨 EDTA나 구연산 분자가 LDH 표면에 노출된 상태로 존재함을 알 수 있었다. 세습 흡착 특성 평가 결과 저농도인 10ppm에서는 55.4% - 77.3%의 흡착 효율과 73.7mg/g - 102.84mg/g의 Qe값을, 고농도인 1000ppm에서는 22.0% - 24.0%의 흡착 효율과 1268.7mg/g - 1378.5mg/g의 Qe값을 보여주었다. 기존의 점토광물의 산처리나 염기처리보다는 LDH에 킬레이트제를 혼합하여 합성한 흡착제들이 전반적으로 더 좋은 성능을 보여주었다. 킬레이트 효과를 이용한 두 흡착제간의 성능은 저농도와 고농도에서의 실험결과가 달라 두 흡착제간의 우열을 가리기 힘들었기 때문에 결과적으로 EDTA보다 값이 싼 구연산 기반의 Cit-LDH를 최적 흡착제로 제시한다.

액체성 방사능 폐기물은 유출에 취약하며, 부피가 큰 탓에 관리 측면에서도 골칫거리를 가지고 있다. 이러한 방식으로 흡착된 흡착제는 다시 간단한 여과를 통해 고액분리가 가능하며, 고체성 방사선폐기물로서 보다 쉬운 관리가 가능하다. 기존의 액체성 방사선 폐기물 처리에 사용하던 여과, 막 분리, 이온교환, 탄소흡착 등의 방식보다 더 경제적으로 액체성 방사능 폐기물을 해결 할 수 있다.

[참고문헌]

- [1] 사용 후 핵연료 처분. 한국원자력환경공단.
- [2] 강정민, (2012) 후쿠시마원전사고이후 일본의 선진 제염해체 및 환경복원 기술 조사 분석 정책연구, 한국과학기술원.
- [3] 김민훈, (2013), 핀란드의 고준위방사성폐기물 관리법제, PUSAN NATIONAL UNIVERSITY.
- [4] 김민훈, (2013), 핀란드의 고준위방사성폐기물 관리법제, PUSAN NATIONAL UNIVERSITY.
- [5] 강태진, (2003), 하나로의 방사성 폐기물 발생 현황 및 레진 교체시 피폭 방사선량 저감에 대한 연구, 한국원자력연구소.
- [6] Lee, S. M. Lee, T . Y, (2016), Modification of Vermiculite for Use as a Floating. Adsorbent for Copper Removal, J. KGS, 17(11), pp. 5-14.
- [7] 대한민국특허청, 국제 특허분류/공개특허 10-2015-0086665.
- [8] 대한민국특허청, 등록특허공보/공개특허 10-2183844.
- [9] 대한민국특허청, 등록특허공보/공개특허 10-2031100.
- [10] Jang, D. Y, (2004), Development of technology to transform Ca-bentonite and multi-functional media used at landfill liner and its structure, Copyright Ministry of Environment.
- [11] Munui Kim, (2019), Adsorption Removal of Cesium from Aqueous Solution using Activated Bentonite, KSWST.
- [12] Keon Sang Ryoo, (2021), Adsorptive Removal of Radionuclide Cs⁺ in Water using Acid Active Clay, Journal of the Korean Chemical Society.
- [13] 대한민국특허청, 공개특허공보/공개특허 10-2019-0078124.
- [14] Sung-won Kang, (2021), Removals of Radioactive Cesium and Iodide by Composite Hydrogel Beads Impregnated with Organoclay and Prussian blue, KSWST.

- [15] El-Enein, S.A., Okbah, M.A., Hussain, S.G. et al. Adsorption of Selected Metals Ions in Solution Using Nano-Bentonite Particles: Isotherms and Kinetics. *Environmental Processes*. 7, 463-477 (2020).
- [16] Tsai, Tsung-Yen & Bunekar, Naveen & LIANG, SZU-WEI. (2016). Effect of Multiorganomodified LiAl- or MgAl-Layered Double Hydroxide on the PMMA Nanocomposites. *Advances in Polymer Technology*. 37. 10.1002/adv.21639.
- [17] Yu, Tao & Qu, Chengtun & Fan, Daidi 외 1명 (2018). Effects of Bentonite Activation Methods on Chitosan Loading Capacity. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*. 13. 14-23. 10.9767/bcrec.13.1.1040.14-23.
- [18] 윤소정, 문희수, (1994). 자원환경지질 = Economic and environmental geology v.27 no.6 ,pp. 507 - 521, 1225-7281, 대한자원환경지질학회
- [19] Beyranvand, Narges & Samiey, Babak & Dadkhah Tehrani, Abbas. (2019). Adsorption Mechanism of Congo Red on Mg-Al-layered Double Hydroxide Nanocompound. *Acta Chimica Slovenica*. 66. 443-454. 10.17344/acsi.2018.4920.
- [20] Moyo, Lumbidzani & Nhlapo, Nontete & Focke, Walter. (2008). A critical assessment of the methods for intercalating anionic surfactants in layered double hydroxides. *Journal of Materials Science*. 43. 6144-6158. 10.1007/s10853-008-2935-0.
- [21] 고상모, 김자영. "Ca-형 및 Na-형 벤토나이트의 제반 물성 및 유기양이온 흡착비교." *한국광물학회지* 15.4 (2002): 243-257.
- [22] 김학주, 정순관, 박기태 외 1명 (2014). 기획특집: 나노 촉매 ; 이중층 수산화물 구조체를 이용한 나노 촉매. *공업화학전망*, 17(2), 1-7.
- [23] 서범경외 18명. (2017), 해체 및 오염 부지 환경복원 기술 개발, 한국원자력연구원.

제7회 방사성폐기물 관리 경진대회 아이디어 및 논문 우수사례집

공단 이사장상 - 우수 아이디어

03

**층상이중수산화물을 이용하여
벤토나이트 완충재
음이온 흡착능 향상방법 개발**

김 주 은 포항공과대학교



아이디어 선정 배경

원자력발전소 운영 시 발생하는 사용후핵연료는 고준위폐기물(HLW: High-level waste)로 분류되며, 높은 열과 방사능을 방출하기 때문에 일정기간 원자력발전소 내 임시저장시설에 보관된다. 심지층 처분은 지하 깊은 곳의 안정한 지층구조에 천연방벽 또는 공학적 방벽으로 방사성폐기물을 처분하는 방식이다. 고준위 폐기물의 처분을 위해 보통 지하 300 ~ 1,000미터 깊이의 암반에 처분시설을 만들어 위험도가 높은 방사성 폐기물을 안전하게 처분하는 영구처분의 개념이다. 고준위폐기물을 처분하기 위한 공학적 방벽시스템은 처분용기, 완충재, 뒤채움재 등으로 구성되며, 이러한 구성요소의 성능은 전체 공학적방벽시스템의 안전성에 큰 영향을 끼친다. 고준위폐기물처분장의 공학적방벽재 중 하나인 벤토나이트 완충재는 주위 암반으로부터의 지하수 유입을 최소화하고, 지하수에 용해된 핵종이 자연상으로 유출되는 것을 저지하며, 외부의 역학적 충격으로부터 고준위폐기물 처분용기를 보호하는 역할을 한다. 일반적으로 벤토나이트 완충재는 양이온에 대해서는 준수한 제거 효율을 보이지만, 음이온의 경우 제거 효율이 매우 낮은 것으로 알려져 있다. 따라서, 현재 완충재로 사용되는 벤토나이트를 기반으로 음이온 제거 효율을 높여 처분 안전성을 높이는 기술 개발이 필요하다.

본 아이디어는 방사성폐기물을 처분하는 심지층 처분에 사용되는 완충재로서 층상이중수산화물로 개질된 벤토나이트로 구성된 완충재를 제조하는 방법 및 이에 따른 완충재에 관한 것으로서, 양이온 방사성 핵종에 대한 양호한 제거효율을 갖는 벤토나이트의 표면을 개질하여 양이온뿐만 아니라 음이온 방사성 핵종에 대해서도 양호한 제거효율을 갖는 완충재 제조방법 및 이에 따른 완충재에 관한 것이다.

아이디어 개요

국내에서는 고준위폐기물로부터 용출되어 이동하는 핵종들을 효과적으로 저지하기 위한 방안들이 연구되어 왔는데, 그 중에서 음이온성 요오드를 완충재 내에서 이동 저지하는 연구가 수행되었다. 요오드는 은 이온(Ag^+)과 잘 결합하여 침전하기 때문에 이동성 요오드 이온을 잡기에 적합한 성분으로, 실제 은 이온을 벤토나이트에 일정량 첨가하여 벤토나이트 표면을 개질하여 요오드의 수착력을 향상시키는 기술을 개발하였다 [1,2]. Ag_2O 를 첨가한 압축벤토나이트에 대하여 요오드 이온의 초기 누출시간과 관통 확산법을 이용한 확산계수를 계산한 결과, Ag_2O 를 첨가한 압축벤토나이트에서 요오드 이온의 초기 누출시간이 지연되는 것으로 나타났다. 그러나 은 이온은 고가의 물질로, 대량으로 사용하기에는 어려움이 있다. 이 외에도 양이온 유기폴리머(Hexadecyltrimethylammonium (HDTMA)과 Cetylpyridinium (CP))를 합성한 유기벤토나이트에 대해 음이온의 흡착특성을 조사하였다 [3]. 그 결과, 무처리 벤토나이트는 인산이온, 질산이온에 대해서 거의 흡착능력을 보이지 않는 반면, 유기벤토나이트는 아주 높은 흡착성을 나타냈다. 하지만 유기물은 방사선에 매우 민감하여 방사선에 조사되면 radiolysis 가스를 발생시킬 수 있으므로 벤토나이트 내 유기물의 함량이 최소로 되어야 한다.

층상이중수산화물(Layered double hydroxides, LDH)는 음이온성 점토 중 하나로, 일반적으로 $[\text{M}_2^{+1-x}\text{M}_3^{+x}(\text{OH})_2](\text{An}^-)_{x/n} \cdot m\text{H}_2\text{O}$ 의 화학식으로 표현된다. LDH는 2가의 금속 양이온(M_2^{+})이 팔면체형 태의 6개의 수산화기에 의해 둘러싸여 있으며, M_2^{+} 일부는 3가의 금속 양이온(M_3^{+})에 의해 동형치환(isomorphic substitution)되어 표면이 양전하를 띠는 이차원 층상구조를 가진다. 이때 양전하의 층상 사이에 음이온(An^-)이 삽입되어 전하 균형을 맞춰주며, An^- 은 다른 음이온으로 교환 가능하다는 특징을 가지고 있다. 본 발명에서는 LDH의 음이온 교환 특성을 이용하여 음이온 흡착능이 향상된 고기능성 표면개질 완충재를 제안하고자 한다.

[1]Sungpaal Yim et al. “An Investigation of Diffusion of Iodide Ion in Compacted Bentonite Containing Ag_2O ”, Journal of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology, Vol.9(1) p.33-40, 2011.

[2]Seungsoo Kim et al. “X-ray Absorption Spectra Analysis for the Investigation of the Retardation Mechanism of Iodine Migration by the Silver Ion Added to Bentonite”, Vol.8(3) p.201-205, 2010.

[3] Jihae Yoon et al. “Anion Adsorption Properties of Organobentonites Modified by Cationic Polymers”, Journal of the mineralogical society of korea, 17(2), 147-155, 2014.

세부 추진방안

<그림 1> M²⁺AlBi LDH-Bentonite 합성방법 개략도

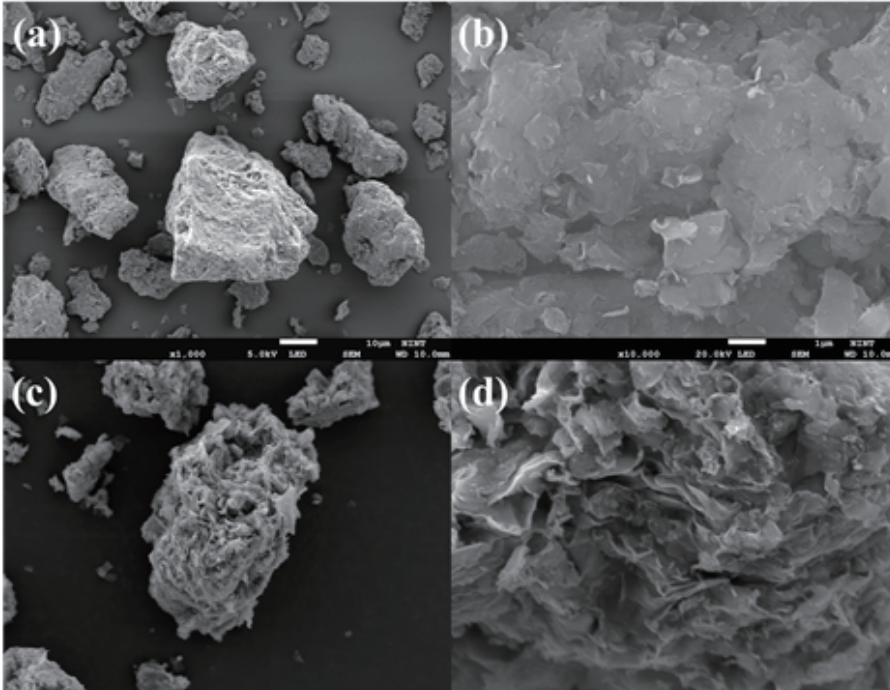


그림 1은 본 아이디어에 따른 LDH-벤토나이트 완충재 제조방법을 개략적으로 도시한 도면이다. LDH-벤토나이트 합성 방법은 다음과 같다.

- ① 100 mL의 초순수에 0.15 mol/L의 $M^{2+}(\text{NO}_3)_2$ ($M^{2+} = \text{Co}^{2+}, \text{Cu}^{2+}$, 또는 Ni^{2+})와 0.03 mol/L의 $\text{Al}^{3+}(\text{NO}_3)_3$, 0.02 mol/L의 $\text{Bi}^{3+}(\text{NO}_3)_3$ 를 넣고 교반한다.
- ② 1번 용액에 벤토나이트를 넣고 교반한다.
- ③ 1 mol/L의 NaOH를 이용하여 pH를 9로 적정한다.
- ④ Teflon reaction vessel 뚜껑을 닫아 밀봉시킨 뒤 80°C 오븐에서 24시간 동안 교반하면서 반응시킨다.
- ⑤ 원심분리를 이용하여 고형물을 분리시킨 뒤 초순수로 3회 세척 후 동결 건조시킨다.

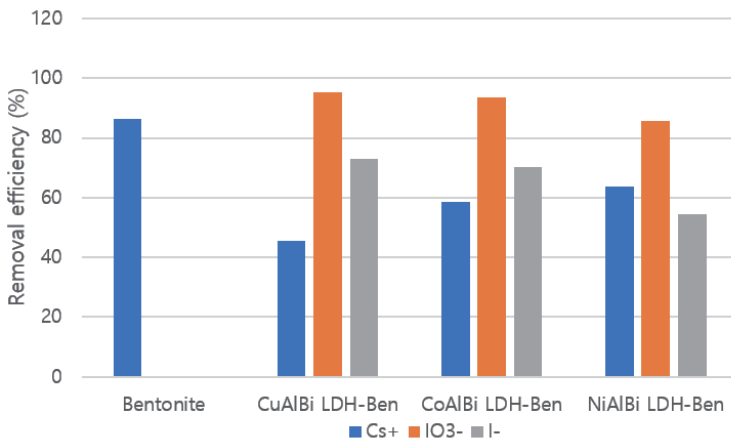
표면이 층상이중수산화물로 개질된 벤토나이트($M^{2+}\text{AlBi LDH-Bentonite}$)의 합성 원리는 다음과 같다. 2가 양이온 금속염과 3가 양이온 금속염을 넣고 NaOH 염기 용액을 넣어 pH 적정 후 숙성(aging)하게 되면 층상이중수산화물이 형성된다. 이때 형성된 층상이중수산화물의 나노입자는 양의 전하를 띠고 있으므로, 음의 전하를 띠는 벤토나이트 표면에 응집되게 된다.

<그림 2> SEM 이미지 : 벤토나이트(a,b) , CuAlBi LDH-Ben(c,d)



합성된 완충재를 주사전자현미경 분석을 진행한 결과 (그림 2), 벤토나이트의 표면에 층상이중수산화물이 응집되어 얇은 층으로 겹겹이 쌓여있는 나노 크기의 입자가 관찰되었다.

<그림 3> M^{2+} AlBi LDH-Bentonite(5g)의 Cs^+ , IO_3^- , I^- 흡착 효율
(고액 반응비 = 0.4g/40mL, 핵종 대상 농도 = 100 mg/L, 반응시간 = 4일)



개질되지 않은 벤토나이트와, 표면이 층상이중수산화물로 개질된 벤토나이트에서의 벤토나이트의 함량을 비교한 결과, 개질되지 않은 벤토나이트의 단위량에 비하여, 동일한 단위량의 개질된 벤토나이트에서의 벤토나이트의 함량이 줄어들어, 개질된 벤토나이트에서 전반적으로 Cs^+ 의 제거효율이 감소하였으나, 개질되지 않은 벤토나이트보다 요오드종(I^- , IO_3^-)에 대한 제거효율이 크게 증가한 것으로 나타난다. 특히, I^- 보다 IO_3^- 의 제거효율이 85% 이상 크게 증가한 것을 알 수 있다.

<그림 4> $M^{2+}AlBi$ LDH-Bentonite 합성 시 Bentonite 함량에 따른 Cs^+ , I^- 흡착량 변화
(고액 반응비 = 0.4g/40mL, 핵종 대상 농도 = 1 mmol/L, 반응시간 = 4일)

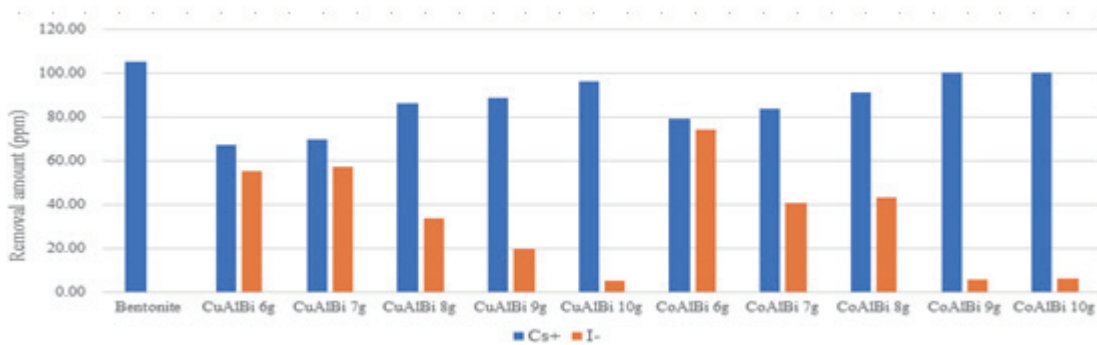


그림 4는 투입된 벤토나이트의 함량에 따른 개질된 벤토나이트의 방사성 핵종의 제거 효율에 대한 실험결과이다. 실험결과, 타겟으로 하는 용액 내 방사성 핵종의 농도나 종류에 따라 벤토나이트 함량을 조절하여 제거효율이 최적화된 개질된 벤토나이트를 제조할 수 있음을 알 수 있다. 음이온 방사성 핵종이 다량으로 존재하는 경우 대략적으로 6g의 벤토 나이트가 투입되어 제조된 개질된 벤토나이트가 적용될 수 있으며, 양이온 방사성 핵종 및 음이온 방사성 핵종 모두 다량으로 존재하는 경우 최적화된 제거효율을 위 하여 대략적으로 7g 내지 8g의 벤토나이트가 투입되어 제조된 개질된 벤토나이트가 적용될 수 있다.

기대효과

본 아이디어에서는 유기물의 사용이 제한되는 고준위방폐장의 특성을 고려하여 무기 화학 첨가제만 사용하여 벤토나이트의 표면 개질을 통하여 음이온의 핵종 제거 능력을 향상시키는 방법에 대하여 제안하였다. 상술한 과제해결수단으로 인하여, 양이온 방사성 핵종에 대한 양호한 제거효율을 갖는 벤토나이트의 표면을 층상이중수산화물로 개질하여 양이온뿐만 아니라 음이온 방사성핵종을 효율적으로 제거할 수 있는 완충재를 제조할 수 있으며, 이에 따라 이러한 완충재가 사용되는 방폐장에서의 방사성 물질 처분의 안전성을 향상시킬 수 있을 것으로 예상된다.

제7회 방사성폐기물 관리 경진대회 아이디어 및 논문 우수사례집

방사성폐기물학회장상 - 논문 1

04

방사성폐기물 안전관리 방안

GIS 기반 위험도 평가 활용 방사성폐기물 처분장
기후변화 적응형 환경안전 모니터링 시스템 구축

유강현, 조희찬 고려대학교 양호준 연세대학교



요약문

국내 원자력 발전소의 운영과 해체를 고려하였을 때, 추가적인 방사성폐기물 처분장의 건설은 불가피하다. 그러나 최근 기후변화에 의해 발생하는 홍수, 산불, 태풍, 지하수 수위 변동 등에 의하여 영향을 받을 수 있는 방사성폐기물의 처분 공간과 주변 공간에 대한 장기적인 환경안전 관리방안은 미비한 실정이다. 이에 본 연구에서는 기후변화를 반영한 위험도 평가 체계의 확립과 방사능 재난에 대한 종합적인 환경안전 모니터링 시스템의 구축을 제안한다. 환경안전 위험도 평가 식에는 위험성, 취약성, 저감성을 구분하여 방사성폐기물의 잠재적인 위협을 반영하고, 기존 연구에서 크게 다루어지고 있지 않은 기후변화·기후재난으로 인한 취약성을 다루면서 장기적인 방사성폐기물의 관리능력 및 위기에 대응하는 능력을 향상시킬 수 있도록 하였다. 그리고 위험지역 내 기후변화 및 방사능 지표식물을 활용한 환경안전 모니터링 공간을 조성하여 관리 및 대응을 시각적으로 국민들과 공유할 수 있는 체계를 만들 것을 제안한다. 더 나아가 시민참여형 모니터링단을 조직 및 운영하여 방사성폐기물 처분장의 안전관리 점검 및 방사성폐기물 처분장 주변 환경에 대한 자료를 확보하고, 시민·환경단체·학계·지방자치단체 및 정부기관 등이 연계한 협력체계 구축 및 교육·홍보를 통하여 지역민들의 방사성폐기물 처분장에 대한 거부감을 완화하고 사회적 수용성을 증진시킬 수 있도록 한다.

목 차

I. 서론

II. 본론

1. 선행연구
2. 기후변화를 고려한 방사성폐기물 처분장 환경안전 위험도 평가
3. 기후변화 적응형 방사성폐기물 처분장 환경안전 모니터링

III. 결론

I. 서론

1967년 봄, 러시아 첼랴빈스크 주의 한 지역에 가뭄이 닥쳤다. 겨울철의 강수량이 부족하고 이른 봄의 더욱 건조한 환경이 조성되면서 마야크 재처리 공장에서 방사성폐기물을 처분하는 장소인 카라차이 호수의 수위가 급격히 떨어졌으며, 결국 호수는 말라붙어 바닥을 드러냈다. 알렉세이(Alexey O. Merkushkin, 2001)의 연구에 따르면 4월에는 강풍이 불면서 노출된 호수바닥의 먼지와 퇴적물이 바람을 타고 광범위한 지역을 덮치면서, 1800km²에 달하는 광범위한 지역과 약 50만 명의 주민들이 피폭 피해를 입었다. 카라차이 호수의 사고는 잘못된 방사성폐기물 관리 방법과 기후재난이 겹쳐 돌이킬 수 없는 참사가 벌어진 대표적 사례이다.

위와 같은 사례의 사고 등을 방지하기 위해서는 방사성폐기물을 관리하는 시설의 존재가 필수적인데, 방사성폐기물 처분장이 대표적이다. 만약 어떠한 종류의 재해가 발생하여 처분시설이 타격을 입는 사고가 발생할 경우, 지표수나 지하수 혹은 대기 등 다양한 유출 경로를 통하여 방사성 물질이 누출되어 광범위한 지역에 치명적인 피해를 입힐 가능성이 있다. 따라서 방사성폐기물 처분장의 부지선정 및 관리는 매우 신중하게 이루어져야 한다. 각종 재난에 대한 철저한 예방과 대비를 위하여 방사성폐기물 처분장은 건설 이후에도 입지한 지역과 그 주변 환경에 대한 지속적인 모니터링이 필수적이다.

현재 국내에는 24개의 원자력 발전소가 운영 중이며, 해체 준비에 들어간 발전소는 2개이고 4개의 원전이 추가로 건설 중이다. 따라서 현재 총 30개의 원자력 발전소가 있다고 할 수 있는데, 원자력 발전소들이 모두 해체되었을 경우 발생할 극저준위, 저준위, 중준위 해체방사성폐기물의 발생량만 약 50만 드럼에 달할 것으로 예측된다(배형록, 2022). 아직까지 국내에서 완공된 방사성폐기물 처분장은 10만 드럼의 방사성폐기물을 처분할 수 있는 경주의 월성 원자력 환경관리센터 뿐이며, 현재 건설 중인 2단계 방사성폐기물 처분장도 12.5만 드럼 규모로 예정되어 있어 결국 추가적인 방사성폐기물 처분장의 건설은 불가피한 상황이며 이에 대한 관리대책이 필요하다(최성대, 2020.11.29.). 또한 정부의 원자력 발전 활성화 정책과 유럽연합의 원자력 발전의 녹색분류체계 포함 시 사용후핵연료 등 고준위 방사성폐기물 처분 방안이 마련되어야 하는데(정종훈, 2022.09.19.), 이러한 점에서 방사성폐기물 처분장에 대한 계획·관리가 중요하다.

원자력 발전소의 운영으로 인한 방사성폐기물의 지속적인 발생과 원자력 발전소 해체에 따른 방사성폐기물 처분 문제를 고려하여 고준위방사성폐기물 심층처분시설에 관한 일반기준, 방사성폐기물 분류 및 자체처분 기준에 관한 규정 및 중·저준위 방사성폐기물 처분시설 입지 평가에 활용되는 기준 등 방사성폐기물 처분 관련 법령들이 마련되고 있다. 그러나 방사성폐기물 처분장 지역에 대한 종합적 위험이나 최근 기후변화에

의해 발생하는 홍수, 산불, 태풍, 지하수 수위 변동 등에 의해 영향을 받을 수 있는 방사성폐기물의 처분 공간과 주변 공간에 대한 장기적인 환경안전 관리방안은 미비한 실정이다. 이에 기후변화를 반영한 위험도 평가 체계의 확립과 방사능 재난에 대한 종합적인 환경안전 모니터링 시스템의 구축을 제안한다.

이 때 방사성폐기물과 방사성폐기물 처분장에 대한 시민의식의 개선이 중요하다. 2005년 11월 경주에서 방사성폐기물 처분장 유치에 관한 주민투표가 이루어졌으며 2008년 실시된 주민투표에 관한 설문조사에 따르면, 주민투표에서 반대표를 냈던 주민들의 52%는 다음 세대를 생각하여 반대한다고 응답했으며 다음으로 45%의 주민들은 사고 발생가능성을 염려하여 반대한다고 응답하였다. 또한 방사성폐기물 처분장을 유치하였을 경우 치러야 할 비용으로 65%의 주민이 사고 발생 등 안전성 문제를 가장 크게 보았고, 다음으로 16%의 주민은 자녀 세대의 영향을 가장 큰 대가로 판단하였다고 응답하였다(황의서, 2013). 이와 같이 방사성폐기물 처분장에 대한 사회적 수용성을 저해하는 가장 큰 원인은 방사성폐기물 처분장의 안전성에 대한 불안과 불신이라 할 수 있다. 따라서 방사성폐기물 처분장에 대한 불안감을 불식시키고 사회적 수용성을 높이기 위해서는 단순히 방사성폐기물 처분장 근처의 방사능 수치만 파악하는 것을 넘어서 방사성폐기물 처분장이 주변 환경에 미치는 영향과 기후변화 재난 등에 의한 확산 가능성을 모니터링하고 그 위험성을 관리하며 이를 투명하게 공개할 수 있는 체계가 마련되어야 한다.

II. 본 론

1. 선행연구

(1) 위험도 평가 관련 국내·외 연구사례

우리나라에서는 위험도와 관련하여 안전도 개념으로 다양한 연구가 이루어지고 있다. 많은 경우에 위험도 및 안전도 평가는 재난에 대한 예방 및 관리 측면에서 진행되고 있다. 건설교통부(2010)는 수자원 장기종합계획 중 홍수피해잠재능과 관련한 연구를 수행한 바 있고 박무중, 전환돈, 정상만(2007)은 우리나라의 풍수해 관련 자연재난 특성에 따른 지역자치단체별 지역의 안전도 평가 연구를 수행한 바 있다. 또한 여창건, 서근순, 송재우(2011)는 도시 홍수 등 재난 위험을 저감하기 위하여 지리정보체계를 활용한 안전도 평가 연구를 수행하였다. 국내뿐만 아니라 국외에서도 재해 위험성과 안전에 대한 연구가 진행되고 있는데 위험도 평가에 관한 연구가 주류를 이룬다. 미국은 지방정부 주체로 재난을 관리하는 평가를 위하여 위험 평가와 역량 진단 평가 체계를 구축하였고 호주는 위험·역량·영향의 세 가지 영역을 중심으로 재난관리체계를 구축하고 있다(임상규, 서보람, 최우정 외 1명, 2017.12.).

방사성 물질 누출 사고는 주민과 환경 등에 치명적인 결과를 초래할 수 있기 때문에, 방사성 물질을 다루는 시설을 대상으로 하여 평가 체계를 활용한 위험도 평가 연구가 진행되고 있다. 김동창 외 3명(2022)은 원자력발전소 안전성 평가를 위한 사건의 식별 및 선별 방법에 대한 연구를 수행하였으며, 정재학(2006), 정관성과 이근우(2011)는 원자력 시설 해체공정에서의 위험성 평가에 대한 연구를 진행하였다. 앞선 사례와 같이 방사성 물질의 처리시설에 대한 위험도를 파악함에 있어 원자력 시설 해체 및 원자력 시설을 중점적으로 연구가 진행되었으나, 원자력 시설을 가동함에 따라 발생하는 방사성폐기물을 처분하는 장소인 방사성폐기물 처분장에 대한 연구는 부족한 것으로 보인다. 이재학 한국원자력환경공단 고준위추진단장은 방사성폐기물 처분장을 만드는 것은 장기적 과제이며, 안전성의 확보가 중요하다고 밝힌 바 있다(서명수, 2022.07.06.). 따라서 본 연구는 점차 필요성이 대두되고 있는 방사성폐기물 처분장의 위험도 평가 방법론을 제안함과 함께 방사성폐기물 처분장의 안전성을 확보 및 신뢰성을 제고할 수 있는 모니터링 시스템과 그 운영방안 체계를 구축하고자 한다.

(2) 방사성폐기물 처분장의 환경안전 고려사항

정종태, 황미정, 최희주(2010)는 방사성폐기물 처분장 시설의 운영 중 안전성을 평가하기 위한 방법론을 제시하였으며, 김민규, 이현미, 이경미(2011)는 중·저준위 방사성폐기물 처분장의 지진위험도에 대한 평가 연

구를 수행하였다. 또한 원자력안전위원회에서는 중·저준위 방사성폐기물 처분시설의 안전성 분석보고서 작성지침을 지정하여 이에 대한 안전성을 관리하고 있다. 이와 같이 방사성폐기물 자체의 안전성과 처분장에 미칠 수 있는 개별 요인에 대한 연구는 진행되고 있으나, 이러한 요인들을 종합적으로 관리하고 예방할 수 있는 시스템은 부족한 것으로 보인다. 또한 기후변화가 가속화되고 기후재난이 증가하고 있어 장기적으로 보았을 때 방사성폐기물 처분장과 같은 시설 관리에도 심각한 위협이 될 것으로 예상되는 것에 반해, 이를 고려한 방사성폐기물 처분장에 대한 장기적 관리방안은 부재하였다.

현재는 방사성폐기물을 발생 장소에서 임시보관하고 있다. 원전부지 내 저장장소가 포화되고 있어, 방사성 폐기물 처분장에 대한 필요도가 점차 증가하고 있다. 하지만 처분장의 안전에 대한 시민들의 불신과 불안에 따라 방사성폐기물 처분장 선정 및 운영에 있어 차질이 있는 상황이다. 따라서 방사성폐기물 처분장의 실질적인 안전성을 증가시키고 함께 시민들에게 안전성에 대한 신뢰도를 제고시킬 수 있는 방사성폐기물 처리 관리 시스템이 필요하다. 이러한 상황들을 고려하여, 본 연구에서는 GIS를 기반으로 한 위험도 평가 방법론을 제안하며 이를 활용하여 방사성폐기물 처분장에 대한 기후변화 적응형 환경안전 모니터링 시스템을 구축하는 방안을 제안한다. 또한 해당 시스템 구축하는 과정에서 지표식물을 활용한 공간을 조성하고 시민참여형 모니터링단을 조직 및 운영하여 종합적 위험성을 관리하고 시민들에 대한 방사성폐기물의 부정적 인식을 바꿀 수 있는 기회를 창출하고자 한다.

2. 기후변화를 고려한 방사성폐기물 처분장 환경안전 위험도 평가

(1) GIS를 이용한 방사성 폐기물 처분장 환경안전 위험도 평가

1) 방사성폐기물 처분장 환경안전 위험도 평가 식

본 연구는 위험도 평가를 통하여 방사성폐기물이 존재하는 특수한 공간에서 나타날 수 있는 위협 요소를 관리하는 방법론으로서 평가 식과 평가 지표를 선정하여 제시하고자 한다. 방사성폐기물이 존재하는 곳의 환경안전성을 관리할 수 있는 위험도 평가는 지리정보체계(GIS)를 이용하여 방사성폐기물로 인한 방사선 및 방사성 물질의 확산 유발 위험 요인을 총체적으로 반영하는 것을 목표로 하며, 궁극적으로는 앞으로 조성될 방사성폐기물 처분장에 대한 종합적 위험도가 높은 지역을 모니터링을 할 수 있는 시스템의 기초가 될 수 있도록 한다. 위험도 평가는 지표별로 평가된 결과의 값을 중첩하여 더하거나 빼는 방식으로 진행한다. 본 연구는 방사성폐기물 처분장에 있어 위험성, 취약성, 적응성을 고려하여 공간정보를 총체적으로 평가함을 통하여 방사성폐기물이 주변 환경안전에 미칠 수 있는 영향을 사전에 파악할 수 있는 시스템을 제안하고자 한다. 이에 위험성, 취약성, 적응성에 해당하는 각 지수와 요인의 지표 값을 공간상에 나타내어 정규화 과정 후 평가 식에 따라 위험도 평가하는 방법론과, 위험도 값이 정량적으로 높게 평가되는 공간에 대한 적절한

한 환경안전 관리 전략을 제시한다. 이를 통하여 방사성폐기물 처분장, 방사성폐기물 중간저장시설 등을 중심으로 해당 공간은 물론 주변 환경에 대한 위험 영향을 파악하여 제공함으로써 환경안전 관리와 재난의 사전예방을 용이하게 하고, 시민들에게 다양한 요인들을 총체적으로 고려하여 문제가 될 수 있는 공간에 대해서는 안전한 관리가 이루어지고 있음을 알릴 수 있어 사회적 수용성 증진에 도움을 줄 수 있다. 또한 본 연구의 환경안전 위험도 평가 식에는 방사성폐기물의 종류·양·저장기간 등에 따른 잠재적인 방사선의 위험성을 위험도 평가에 반영하고, 기존 연구 및 기준에서 크게 다루어지고 있지 않은 기후변화·기후재난으로 인하여 방사성폐기물이 환경안전에 부정적 영향을 미칠 수 있는 부분을 취약성 부분에서 다루면서 장기적인 방사성폐기물 관리의 지속가능한 대응능력을 향상시킬 수 있도록 하였다.

사전적인 위험의 발생이 나타날 수 있는 정도를 정량적으로 표현한 위험도는 다양한 재난에 대해 관리의 효율성을 높이고 위험도에 영향을 미치는 인자에 따라 대책을 강구할 수 있도록 돕는 방사성폐기물 안전성 확보 방안이 될 수 있다. 비슷한 개념으로는 위험성이 존재하는 재난 등에 대해 안전한 정도를 파악할 수 있도록 하는 안전도 개념이 있다. 이창희, 이석민, 여창건(2006)은 홍수 재난 위험에 있어 안전도를 평가하는 선형 관계식을 도입하였다(식 1). 안전도는 위험성 지수에서 저감성 지수를 감산하여 계산하였다. 위험성 지수에는 안전에 위협이 되는 요인을 반영하였고, 저감성 지수에는 위협에 대해 저감할 수 있는 시설·행정적인 요인을 반영한 바 있다.

$$\text{안전도 지수} = \alpha \times \text{위험성 지수} - \beta \times \text{저감성 지수} + \gamma \quad (1)$$

위의 위험성과 저감성을 활용한 선형 관계식은 발생가능성이 있는 재난의 위협적인 정도를 나타낸다는 점을 고려하여 본 연구에서는 방사성폐기물로 인하여 발생할 수 있는 위협을 위험성, 취약성, 저감성 지수를 통하여 나타내는 평가 식을 제안한다(식 2). 위험도 지수를 파악하기 위하여 위험 정도와 위협에 대한 저감 정도를 나누어 고려하고자 하였다. 위험 정도는 방사성폐기물 종류·양 등에 따라 직접적으로 영향을 미치게 되는 방사선 위협을 반영한 위험성 지수와, 환경생태적 요인으로 나타날 수 있는 방사성폐기물의 영향에 대해 취약할 수 있는 요소를 반영한 취약성 지수로 나누어 반영하고자 하였다. 저감 정도는 방사성폐기물이 외부로 노출되거나 방사성폐기물로부터 방사성 물질이 외부로 확산되는 경우 등의 발생할 수 있는 상황에 대하여 예방하거나 대응할 수 있는 적응능력의 개념을 의미하는 저감성 지수로 반영하고자 하였다.

$$\text{위험도 지수} = \alpha \times \text{위험성 지수} + \beta \times \text{취약성 지수} - \gamma \times \text{저감성 지수} \quad (2)$$

위험도 지수를 평가하는 식에서 α , β , γ 는 각 지수의 계수이다. 이는 각 지수가 위험도를 평가함에 있어 기여하는 정도의 가중치를 말한다. 위험성 지수, 취약성 지수, 저감성 지수의 가중치는 전문가 등의 설문조사를 반영하여 산정하도록 한다. 평가 식을 이용하여 산출된 위험도의 정보는 GIS를 이용하여 맵 형식으로 표현

할 수 있으며 원전, 방사성폐기물 처분장, 방사성폐기물 중간저장시설 등이 입지한 공간과 예정 부지 및 주변 환경에 대해 위험도를 관리할 수 있도록 한다.

위험성 지수는 방사성폐기물의 방사선 등이 인간 또는 환경·생태계의 안전을 위협할 수 있는 요인을 반영한 것으로, 방사성폐기물로 인하여 발생하는 방사선량의 위협 정도를 나타내는 방사선 요인과 방사선 농도를 결정하는 방사성폐기물의 종류·저장기간 및 방사성폐기물의 양을 고려하는 방사성폐기물 요인으로 구분하여 계산한다(식 3). 취약성 지수는 위험에 대한 민감도를 높이고 잠재적 영향을 나타낼 수 있는 정도를 의미하는 취약성의 개념을 고려하여 설정한다. 이러한 취약성은 일반적으로 부정적인 영향을 받는 경향으로 설명되므로 방사성폐기물이 지역의 환경적 요소 또는 기후재난·지진 등의 자연재난 등에 의하여 노출·확산되어 해당 지역과 주변 지역에 위험성을 증가시킬 수 있는 가능성과 노출·확산되었을 시의 부정적 영향이 지역의 생태계에 미칠 때 취약한 정도를 파악하기 위하여 확산 요인, 재난 요인, 생태 요인을 구분하여 계산한다(식 4). 저감성 지수는 방사성폐기물의 위험성과 취약성으로 인하여 발생할 수 있는 문제점을 예방하거나 해결할 수 있는 지역 및 관리 측면의 대처능력을 반영한 것으로, 관리 요인과 지역 요인으로 구분하여 계산한다(식 5).

$$\text{위험성 지수} = \alpha_1 \times F1(\text{방사선 요인}) + \alpha_2 \times F2(\text{방사성폐기물 요인}) \quad (3)$$

$$\text{취약성 지수} = \beta_1 \times F3(\text{확산 요인}) + \beta_2 \times F4(\text{재난 요인}) + \beta_3 \times F5(\text{생태 요인}) \quad (4)$$

$$\text{저감성 지수} = \gamma_1 \times F6(\text{관리 요인}) + \gamma_2 \times F7(\text{지역 요인}) \quad (5)$$

위험성 지수를 산출하는 식을 구성하는 α_1 , α_2 는 각각 방사선 요인과 방사성폐기물 요인의 가중치이며 α_1 , α_2 의 합은 α 와 같다. 취약성 지수를 산출하는 식을 구성하는 β_1 , β_2 , β_3 은 각각 확산 요인, 재난 요인, 생태 요인의 가중치이며 β_1 , β_2 , β_3 의 합은 β 와 같다. 저감성 지수를 산출하는 식을 구성하는 γ_1 , γ_2 는 각각 관리 요인과 지역 요인의 가중치이며 γ_1 , γ_2 의 합은 γ 와 같다. 각 지수를 구성하는 요인별 가중치는 위험도 지수를 구성하는 지수의 가중치와 같이 전문가 등의 의견을 조사하여 중요도에 따라 값을 설정할 수 있다. 이에 전문가의 의견을 고려할 수 있는 방안인 위계적 계층분석법(AHP)을 본 연구의 기초적인 가중치 설정 단계에서 적용하도록 한다. 위계적 계층분석법을 통한 설문조사 시 설문의 대상인 전문가에는 방사성폐기물 및 방사능에 관한 전문가 또는 연구시설 종사자 등을 포함시킬 수 있도록 하고, 기후변화 및 기후재난에 의한 환경생태적 영향을 고려하여 학계의 의견을 들으며, 원전 또는 방사성폐기물 처분장의 시설안전 관리자 및 해당 지역의 관리 담당 실무자 등을 설문대상에 포함시켜 위험도 평가가 실질적인 환경안전 관리에 도움을 줄 수 있도록 하고 국민들이 전문성을 기반으로 한 신뢰성을 형성할 수 있도록 하여야 한다.

2) 방사성폐기물 환경안전 위험도 평가 지표 선정

방사성폐기물 처분장의 환경안전 관리를 위한 위험도 평가에 선정하는 지표들은 각 지수와 요인에 맞는 방사성폐기물의 위험성과 방사성폐기물의 영향에 대한 취약성, 방사성폐기물 처분장의 대응능력 등을 판단함에 필요한 요소들을 반영하여야 한다. 본 연구는 방사성폐기물 환경안전 위험도 평가 시 필요할 것으로 예상되는 지표들을 선정하여 제시함으로써 방사성폐기물 처분장의 사람과 환경에 대한 방사성폐기물의 영향을 종합하여 정량적 수치로 모니터링할 수 있는 기반을 조성할 수 있도록 한다. 국민들이 파악하기 어려운 지침이나 보고서가 아닌 맵 형태의 데이터로 제공되어 전문적인 관리에 이용되므로 국민들과 방사성폐기물 처분장이 입지한 지역의 주민들이 이해하기 쉬운 종합적인 모니터링 시스템을 구축할 수 있다.

위험성 지수는 방사선량을 나타내는 방사선 요인과 방사능과 관련한 방사성폐기물 요인을 합한 값으로 결정한다. 방사성폐기물 처분장으로부터 나타날 수 있는 방사선량이 큰 경우 생태계는 물론 인간의 건강에도 악영향을 미칠 수 있으므로 방사선량을 방사선 요인의 지표로 선정하였으며, 방사성폐기물의 준위에 따른 종류와 저장기간에 따라 방사능 농도가 달라져 위험성의 정도가 달라지고 처분장의 방사성폐기물의 양에 따라 방사성 물질이 일으킬 수 있는 잠재적 피해가 달라질 수 있으므로 방사성폐기물의 준위 종류, 저장기간과 방사성폐기물의 양을 방사성폐기물 요인의 지표로 선정하였다(표 1).

<표 1> 위험성 지수의 요인별 가중치 및 지표

위험성 지수	가중치	지표
방사선 요인	α_1	방사선량
방사성폐기물 요인	α_2	방사성폐기물 준위 종류
		방사성폐기물 저장기간
		방사성폐기물 양

방사선 요인의 방사선량은 방사선에 노출되면서 인체에 발생할 수 있는 위해성을 바탕으로 위험성 지수의 지표로 선정하였다. 심창섭과 홍지연(2011)은 방사선은 방사선 전리현상을 통하여 세포 및 유전자의 화학적 구조를 변형시키는 유해성을 가지고 있으며 잠재적 유해성이 세대를 거듭하여 장기적인 영향을 나타낼 수 있으므로 저선량이라도 방사선의 영향을 체계적이고 정량적으로 파악하기 위한 노력이 필요하다고 보았다. 따라서 방사성폐기물 처분장의 경우 그 주변의 방사선량을 위험성 지표로 선정하여 인체 및 환경에 영향을 미칠 수 있는 방사선량을 공간적 분포로서 반영할 수 있도록 한다. 방사선량은 우리나라의 국가환경방사선 자동감시망(IERNet)의 환경방사선 감시기와 함께 원자력 발전소 주변의 기체 유출물 배출 방사능 확인 시스템과 같이 조성되는 방사성폐기물 처분장 공간 및 주변공간에 설치하는 실시간 사물인터넷(IoT) 센서의 네트워크를 통하여 측정할 수 있도록 한다. 한국과학기술정보연구원은 사물인터넷 망을 이용해 방사선 감시 데이터를 실시간으로 공유할 수 있도록 한국원자력안전기술원의 방사선자동감시망과의 시범사업을 진

행한 바 있고(길에경, 2018.09.17.), 김보길(2020)은 방사능 재난을 대비한 사물인터넷(IoT) 기반의 방사선 측정기를 개발하고자 연구를 진행한 바 있다. 사물인터넷 센서를 통하여 실시간으로 방사선량의 값을 도출할 수 있다면 지리정보체계의 보간 기능을 통하여 방사선량 값을 전체 공간상에 연속적으로 나타내어 방사성폐기물 처분장 주변의 방사선 노출 정도를 세밀하게 파악할 수 있다. 사물인터넷 센서와 기존 감시기 등을 통하여 방사성폐기물 처분장 주변의 특정 지점에서 측정한 방사선량의 값을 지리정보체계 상의 역거리가중법(IDW)으로 보간하여 방사선량 분포도를 도출하고 안전목표치와 비교하여 위험성 지수에 적용한다.

방사성폐기물 요인은 방사성폐기물에 따라 노출 시 위험성이 달라지기 때문에 방사성폐기물 준위 종류, 저장기간, 양 등을 지표로 선정한다. 방사성폐기물은 방사능 농도에 따라 극저준위 방사성폐기물, 저준위 방사성폐기물, 중준위 방사성폐기물, 고준위 방사성폐기물 등으로 분류된다. 원자력안전위원회고시(제 2019-10호) 「방사선방호 등에 관한 기준」은 반감기 20년 이상인 알파선을 방출하는 핵종으로 방사능 농도 4,000Bq/g 및 열발생률 2kW/m³을 중·저준위 방사성폐기물과 고준위 방사성폐기물의 구분 기준으로 정하고 있어, 준위 종류에 따라 방사성폐기물의 방사능 농도가 달라 위험성도 달라지므로 지표로 고려하였다. 또한 반감기를 고려하였을 때 일정 시간이 지남에 따라 대부분의 방사성폐기물은 방사능 농도가 낮아져 위험성에 변화가 일어날 가능성이 있으므로(오길종 외 3명, 2013) 방사성폐기물의 저장기간을 고려한다. 이에 더하여 방사성폐기물의 양에 따라서 방사성 물질이 누출될 시 발생할 수 있는 잠재적인 방사능 재난의 위험성이 커질 수 있다. 이에 방사성폐기물의 처분장의 방사성폐기물의 양도 지표로서 고려한다. 방사성폐기물 요인의 지표는 방사성폐기물 처분장에 존재하는 방사성폐기물의 수치를 근거로 하므로 방사성폐기물 처분장이 입지한 행정구역과 인접한 행정구역에 반영하여 위험성 지수에 적용한다.

취약성 지수는 방사성 물질의 확산에 영향을 미칠 수 있는 확산 요인, 방사성 물질의 누출 사고를 유발할 수 있는 재난 요인, 방사성 물질이 방출되었을 때 환경 및 생태 측면에서 영향을 유발하여 민감하게 작용하는 취약한 요소를 의미하는 생태 요인을 합한 값으로 결정한다. 일반적으로 방사성폐기물이 외부로 노출되고 방사성 물질이 확산되는 경우 대기나 수계를 통하여 확산이 이루어질 수 있으므로 풍속 등의 기상요인과 수계의 인접 정도 및 특성을 확산 요인의 지표로 선정하였다. 또한 자연재해 등의 재난의 발생은 방사성폐기물 처분장 또는 처분장이 위치한 지역에 피해를 입히면서 방사성폐기물의 외부 노출 및 방사능 누출 재난을 발생시킬 가능성이 있으므로 기후변화로 인한 불확실성을 가진 기후성 재난과 지진·지진해일 등의 지질성 재난 발생가능성을 재난 요인의 지표로 선정하였다. 장기간의 방사선 노출은 환경변화에 민감한 생태계에 영향을 미치게 되는데 방사능 오염이 토양, 하천, 산림, 해양 및 동식물 등에 축적되는 경우 생태계의 건강성에 문제가 발생할 수 있으므로 생태적 중요성 및 민감성을 고려하여 생태자연도·국토환경성평가지도·멸종위기야생생물 분포지역 등을 생태 요인의 지표로 선정하였다. 취약성 지수를 구성하는 요인별 지표는 다음과 같다(표 2).

<표 2> 취약성 지수의 요인별 가중치 및 지표

취약성 지수	가중치	지표
확산 요인	β_1	풍속·풍향
		수계(지표수·지하수), 해안
		인접거리 및 특성
재난 요인	β_2	기후성 재난
		홍수
		산불
		태풍
	지질성 재난	지진
		활동성단층
		지질구조
생태 요인	β_3	생태자연도
		국토환경성평가지도
		야생생물보호구역

확산 요인은 방사성폐기물 처분장으로부터 방사성 물질이 확산될 수 있는 가능성에 대해 취약한 정도를 파악하기 위한 요인이며 이에 대하여 대기·수계를 통한 확산을 고려하여 풍속과 수계로부터의 인접거리 및 지하수의 물리화학적 및 유동 특성 등을 지표로 선정하였다. 원자로 시설 부지의 경우 적합성 평가 시 기상조건의 조사·평가를 할 수 있도록 되어 있고 원자력안전위원회 고시(제2017-26호) 「원자로시설 부지의 기상조건에 관한 조사·평가 기준」에 따라 대기 조건과 풍속·풍향 등 기상조건을 관측하여 기체 방사성 물질의 확산을 고려하도록 되어 있다. 또한 방사성 물질의 확산을 예측할 때 주로 사용되는 직선궤적 가우시안 플룸 모델에서 풍속은 기본적으로 요구되는 변수이다(황원태, 김은한, 정해선 외 2명, 2013). 따라서 확산 요인 중 대기확산의 지표로서 풍속을 선정하고 대기를 통한 확산모델의 구성요소로서 풍속을 고려하여 확산으로 인하여 나타날 수 있는 영향을 취약성 지수에 반영하도록 한다. 수계와 해양은 방사성 물질을 확산시킬 수 있는 다른 요소로서 원자력안전위원회 고시(제2017-27호) 「원자로시설 부지의 수문 및 해양특성에 관한 조사·평가 기준」에 따라 하천·수로 등의 수계와 해수범람·해수면 등을 조사하도록 하고 있다. 따라서 방사성 폐기물 처분장으로부터 해안이나 수계까지의 인접거리를 파악하여 확산 가능성을 취약성 지수에 적용하도록 한다. 또한 지하수도 방사성 물질의 확산에 영향을 줄 수 있다. 지하수의 특성은 방사성폐기물 처분장에서 혹시 누출될 수 있는 방사성 물질의 이동을 지연시키거나 촉진시킬 수 있는데, 환원 상태의 지하수의 경우에는 핵종이 침전되어 지하수를 따라 흐르기 어렵지만 핵종이 콜로이드에 흡착될 경우 빠르게 이동하게 된다(박경우, 김경수, 고용권 외 2명, 2017). 이를 고려하여 지하수의 물리화학적 특성과 지하수 유량과 분포를 파악하기 위한 유동 모델 등을 취약성 지수에 적용한다.

재난 요인 중 기후성 재난의 지표로는 기후변화에 따라 발생빈도와 강도가 강해지고 있는 홍수, 산불, 태풍을 선정하였다. 홍수 및 폭우 등의 기후성 재난이 발생하는 경우 강우 강도에 따라서 사면안정성에 영향

을 주고 사면붕괴·산사태를 유발하여 방사성폐기물 처분장의 시설에 위협을 가할 수 있고(이민석, 김교원, 2009) 홍수에 의하여 방사성 물질이 지표수 등으로 확산될 수 있으므로 홍수를 재난 요인의 지표로 선정하였다. 산불의 경우 급속도로 번진 산불이 한울원자력발전소 부지로 향하여 위협을 가한 사건이 발생한 경험을 고려하여(김정석, 2022.03.04.), 재난 요인의 지표로 선정하였다. 원전 내에서의 화재사고뿐만 아니라 외부에서 일어난 산불 등의 화재로 인한 위험성을 확인하고 관리할 필요가 있으므로 이를 재난 요인에 적용하도록 하여야 한다. 최근 증가하고 있는 대형 산불에 대한 분석결과 한반도가 속한 중위도 지역에서는 산불에 기온이 기여하는 부분이 절대적이라는 것을 확인할 수 있었는데(조승한, 2021.02.24.), 지금과 같은 기후변화 추세가 지속될 경우 대형 산불의 발생위험 또한 높아짐을 알 수 있다. 태풍은 방사성폐기물 처분장 건축물 자체에 영향을 끼칠 수 있으며, 방사성 물질의 확산에도 영향을 미칠 수 있어 재난 요인의 지표로 선정하였다. 후쿠시마 일대에서는 방사성폐기물이 태풍 하기비스 등 태풍 영향으로 떠내려가면서 방사성 물질의 유출지역이 확장된 바 있다(조승한, 2019.10.14.). 한반도는 서태평양에 위치하고 있어 미래에 강한 태풍이 증가하였을 경우 그 피해가 커질 확률이 높고(고아라, 오재호, 2010). 암스테르담 자유대가 이끈 국제공동연구팀의 연구에 따르면 기후변화 영향의 해수면 온도 상승에 따라 3등급(최대 풍속 50~58m/s) 이상의 강력한 열대 저기압은 두 배 더 발생하고 최대 풍속이 20% 증가할 것으로 예측되었다(이근영, 2022.05.02.). 이렇듯 강력한 태풍은 방사성폐기물 처분장에 영향을 끼칠 수 있으며, 증가된 강수량과 풍속으로 인해 방사성 물질이 유출되었을 때 확산 범위를 확장시키므로 태풍을 재난 요인의 지표로 선정하였다. 우리나라의 홍수위험지도 등 기후재난에 대한 다양한 연구·계획 및 재해취약도 등을 고려하여 각 지표에 대한 위험지도를 재난 요인에 적용하도록 한다. 이를 통하여 기후변화에 따라 발생가능성이 높은 기후재난의 위험지역을 방사성폐기물의 취약성에 반영한다.

재난 요인 중 지질성 재난의 지표로는 지진 등의 재난에 대한 안전성을 고려하여 지진, 활동성단층지역, 지질구조 등을 선정하였다. 원자력안전위원회 고시(제2021-21호) 「고준위방사성폐기물 심층처분시설에 관한 일반기준」에서는 부지 선정 시 지질학적 안정성을 고려하도록 하고 있다. 지질학적 안정성 기준으로는 활동성단층지역에 속하지 않음과 역사적 지진 발생빈도·규모·진도 및 지각변동에 의한 영향 등이 있다. 이를 고려하여 부지 및 인근지역의 지진 발생빈도 및 최대 진도 등과 활동성단층지역 해당 여부를 확인하여 행정구역별로 적용한다. 핀란드와 스웨덴 등 국외의 방사성폐기물 처분시설 부지선정 과정에는 연성지질구조와 취성지질구조를 고려하여 방사성폐기물 격리에 대한 적합성을 고려한다(채병곤, 최정해, 김유흥 외 1명, 2017). 따라서 지질구조를 조사하여 부적합한 지질구조를 가진 지역의 경우 방사성폐기물 격리 또는 방벽으로서의 역할에 취약성이 나타날 것으로 예상되므로 지질구조에 대한 고려도 필요하다.

생태 요인은 방사능 재난 또는 방사선에 의한 생태계의 민감성을 반영하기 위한 것으로 생태자연도, 국토환경성평가지도, 야생생물보호구역 등을 지표로 선정하였다. 생태자연도는 자연환경보전법에 따라 산·하천·

내륙습지·호소·농지·도시 등에 대하여 자연환경을 생태적 가치, 자연성 등에 따라 등급화하여 작성하는 지도로 중요하고 보호하기 위한 생태 가치를 반영할 수 있다. 생태자연도 1등급·2등급·3등급 권역과 별도관리 지역에 따라 다른 생태 가치를 취약성 지수에 적용한다. 국토환경성평가지도는 환경정책기본법에 따라 토지를 환경생태적 기준과 법제적 보호지역 등을 바탕으로 평가하여 1등급~5등급 지역으로 구분한 것으로 등급별 환경생태적 가치를 반영할 수 있다. 야생생물보호구역은 야생생물 보호 및 관리에 관한 법률에 따라 멸종위기야생생물 등을 보호하기 위하여 지정하는 구역으로 특별한 보호를 필요로 하는 야생생물에 대한 영향을 반영할 수 있다. 후쿠시마 원전 방사능에 의하여 야생생물의 수명을 단축시키고 기형을 유발한다는 연구가 존재하므로(최영준, 2014.09.23.), 생태계 건강성을 보여주는 야생생물에 대한 보호구역 현황을 취약성 지수에 적용한다. 생태자연도와 국토환경성평가지도는 환경부를 통하여 지도 데이터를 활용하고, 야생생물보호구역의 경우 환경부를 통하여 지정 현황 데이터를 파악하여 적용한다.

저감성 지수는 방사성폐기물 처분장에서 이루어지는 직접적인 모니터링 및 점검의 주기나 횟수, 그리고 처분장 시설의 자체적 대응능력 등이 포함되는 관리 요인과, 해당 지역 차원에서 재난 및 사고에 대응이 가능한 조례나 매뉴얼 및 지방자치단체 차원의 재정자립도 등이 포함되는 지역 요인을 합한 값으로 결정한다. 방사능 누출을 예방하기 위해서는 근본적으로 균열 등의 시설물 결함을 살피고 환경안전 등에 대한 모니터링을 진행하는 것이 중요하기 때문에 정기 모니터링의 주기, 정기 점검의 주기, 특별 점검 여부 등을 관리요인의 지표로 선정하였다. 일상적인 예방 조치와 비상 상황 시 신속하고 정확한 대응의 중요성을 고려해 직원 안전 교육의 여부와 방사성폐기물 관리 및 재난대응 시나리오 매뉴얼 여부를 관리 요인의 지표로 삼았다. 안전관리 사항의 제정을 통하여 방사능 재난을 예방할 수 있고, 조례 및 매뉴얼이 준비되어 있을 경우 방사능 재난 시 지방자치단체 차원의 신속한 주민대피를 수행할 수 있어 피해를 줄일 수 있을 것으로 기대되므로 지방자치단체의 방사능 관련 조례, 시나리오 매뉴얼의 존재 여부를 지역 요인의 지표에 포함시켰다. 그리고 빠르고 효율적인 대처를 위해서는 자체적인 자금 조달능력이 필요하므로 방사성폐기물 처분장이 입지한 지방자치단체의 재정자립도를 지역 요인의 지표로 선정하였다(표 3).

<표 3> 저감성 지수의 요인별 가중치 및 지표

저감성 지수	가중치	지표
관리 요인	γ1	정기 모니터링의 주기
		정기 점검의 주기
		특별 점검 여부
		직원 안전 교육 여부
		방사성폐기물 관리 시나리오 매뉴얼 여부
		재난대응 시나리오 매뉴얼 여부

지역 요인	y2	지방자치단체 방사능 관련 시나리오 매뉴얼 여부
		지방자치단체의 재정자립도
		지방자치단체 재난관리 조직·인력 운영 적절성
		지방자치단체 방사능 관련 조례 여부

행정안전부는 재난관리평가의 주요 평가지표를 재난관리단계(공통단계, 예방단계, 대비단계, 대응단계, 복구단계)별로 구분하여 제시한 바 있다(행정안전부, 2019). 본 연구는 방사능 재난에 대한 위험성과 취약성에 대한 저감 요소로서 해당 재난관리평가에 활용되는 관리지표를 반영하고자 하였다.

시설물 안전관리는 재난관리평가 시 예방단계에서의 핵심 역량을 나타내는 요소이기 때문에 시설·방사성 폐기물 등에 대한 모니터링 및 점검 여부를 안전관리 능력으로서 관리 요인의 지표로 설정하였다. 정기 모니터링의 주기와 정기 점검의 주기, 특별 점검 여부를 통하여 긴급 사태가 발생하더라도 이를 빠르게 포착하여 대처할 수 있는 확률을 높일 수 있는 가능성을 확인할 수 있으므로 저감성 지수의 관리 요인 지표로 고려되었다.

또한 재난관리평가 시 예방단계에서 안전교육에 대한 항목이 포함되어 있으므로 이를 근거로 직원 안전 교육 여부를 관리 요인의 지표로 선정하였다. 서균렬 서울대학교 원자핵공학과 교수는 체르노빌 원전사고와 후쿠시마 원전사고가 원전 관계자들의 안전불감증에서 비롯된 인재이며, 원전 사고의 90%는 잘못된 인식함에서 비롯된다고 강조한 바 있다(지우현, 2017.05.01.). 원전 사고 등을 고려하여 방사성폐기물 처분장에서의 사고 또한 치명적인 방사성 물질 확산으로 직결될 위험성을 가지고 있기 때문에, 종사자들에게 철저한 안전 교육이 이루어져야 한다.

재난관리평가에서 대비단계의 주요 평가지표에는 매뉴얼 관리가 포함되어 있다. 또한 재난 및 안전관리 기본법 제34조의5에 따르면, 재난관리책임기관의 장은 재난을 효율적으로 관리하기 위해 재난유형에 따라 위기관리 매뉴얼을 작성·운용하여야 한다고 명시되어 있다. 이러한 사실들을 근거로 방사성폐기물 관리 시나리오 매뉴얼 여부와 재난대응 시나리오 매뉴얼 여부를 관리 요인의 지표로 삼았으며, 지역 요인의 지표인 지방자치단체 방사능 관련 시나리오 매뉴얼 여부 또한 이를 근거로 설정하였다.

재난관리평가 시 대비단계의 주요 평가지표에는 재난관리자원이 포함되어 있는데, 이를 반영하여 지방자치단체의 재정자립도를 지역 요인의 지표로 선정하였다. 재정자립도는 재정활동에 필요한 자금을 얼마나 자체적으로 조달할 수 있는가를 나타내는 지표로, 위기 상황 시 단시간 내로 투입될 수 있는 정도를 파악할 수 있으며 재정자립도가 높을수록 방사능 재해에 대한 효율적인 예방과 대처가 가능해진다. 재정자립도는 지방자치단체에서 제공하는 정보를 활용한다.

재난관리평가에서 공통단계의 주요 평가지표 중에는 재난관리 조직·인력 운영 적절성이 존재한다. 이를 반

영하여 지방자치단체의 재난관리 조직·인력 운영 적절성을 지역 요인의 지표로 선정하였다.

이에 더하여 지방자치단체에서의 조례 제정은 원자력시설의 안전관리에 대한 효율적 대응 및 정책을 수립할 수 있는 근거를 마련할 수 있을 뿐만 아니라, 정부 및 국회에 지방자치단체의 책임에 따른 권한 부여 등을 요구할 명분을 얻을 수 있게 되어 방사능 재난을 예방하고 시민의 안전을 확보하는데 도움이 될 수 있다(조현철, 2020.06.21.). 따라서 마지막으로 지방자치단체의 방사능에 관련된 조례 제정 여부를 지역 요인으로 선정하였다.

각 지수의 요인별 지표는 서로 다른 단위의 값을 가지므로 이를 계량화할 필요가 있다. 따라서 정규화를 통하여 지표가 가지는 단위를 조정한다. 본 연구에서 제시하는 정규화의 공식은 다음과 같다(식 6).

$$\text{정규화(Normalize)} = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (6)$$

정규화 공식의 X는 지표의 값, Xmax는 지표의 최댓값, Xmin은 지표의 최솟값을 말한다. 정규화 과정을 통하여 모든 지표는 0과 1 사이의 값으로 조정된다. 이를 통하여 단위가 달라 특정 지표가 위험도 평가에 미치는 영향력이 크게 다르게 되는 문제점을 예방하고 비교가 가능하도록 한다. 정규화를 거친 지표는 위험도 평가의 지수에 대한 기여도에 따라 가중치를 곱하여 평가 식에 따라 위험도 평가를 수행하게 되고, 방사성 폐기물 처분장을 중심으로 한 공간 또는 지역별 종합적 위험도를 산출할 수 있다.

3. 기후변화 적응형 방사성폐기물 처분장 환경안전 모니터링

(1) 기후변화 관리 시스템 및 위험도 평가 연계 방사성폐기물 처분장 모니터링

1) 기후변화 시나리오를 적용한 방사성폐기물 처분장 환경안전 위험도 평가의 활용

방사성 물질 기반 시설들은 폭우, 태풍, 홍수, 해수면 상승 위기에 노출되어 시설에 대한 기후위기 리스크가 발생할 수 있다. 이러한 기후위기 리스크는 기후변화 시나리오를 통하여 확인할 수 있다. 기후변화 시나리오는 지구시스템 모델에 인간 활동이 원인이 되어 증가되는 복사강제력의 변화를 적용하여 산출된 미래의 기온, 강수량 습도 등의 기후 관련 정보를 말한다. 본 연구에서는 앞서 제시한 위험도 평가를 기반으로 한 상시적 모니터링 체계의 구축을 위하여 방사성 물질의 누출을 유발하고 방사성 물질의 확산을 촉진할 수 있는 인자들에 기후변화 시나리오를 반영하여 장기적 대비·관리에 활용하고자 한다.

본 연구에서는 IPCC 5차 평가보고서에서 발표한 온실가스 농도 전망 기법인 대표농도경로(Representative Concentration Pathways, RCP)를 사용하고 기상청의 기후변화 시나리오 기반 미래 기후전망 등을 기준으

로 값을 산출하여, 기후변화 시나리오에 따라 기후변화 영향으로 인해 변동될 수 있는 요인들을 고려하여 환경안전 위험도 평가 식에 적용할 것을 제안한다. 대표농도경로의 종류는 온실가스 감축 실현 정도를 고려한 2100년의 이산화탄소 농도에 따라 RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5로 구분된다. 기후정보포털에서는 기후변화 시나리오별로 기온, 강수량 및 강수강도, 폭염일수 등에 대한 변화 값을 격자 또는 행정구역별로 제공하고 있다. 소방방재청에서는 RCP 8.5 기후변화 시나리오에 따른 우리나라의 기본풍속도의 변화가 존재한다는 것을 밝힌 바 있다(기상청, 2018). 더하여서 기상청과 APEC 기후센터(APCC)는 고탄소 및 저탄소 시나리오를 나누어 국내 하천 유역별 극한 강수량의 미래 변화분석을 시행하였는데, 고탄소 시나리오의 경우 전국의 평균 극한 강수량이 지금보다 53% 급증할 것으로 추정하였다. 강수량 증가에 따라 홍수 위험도 또한 동해 인근과 제주 권역에서 뿔 것으로 예상하였다(곽현호, 2022.06.14.). 이러한 기후변화 시나리오별 변화요소를 반영하여 위험도 평가의 지표 값 변화를 예측하고 미래의 기후변화 정도에 따른 위험도 값을 산출할 수 있도록 한다. 이를 통하여 4가지 RCP 시나리오별 환경안전 위험도 지도를 작성하여 비교하며 위험도를 줄일 수 있는 방안을 강구함으로써 장기적으로 방사성폐기물을 안전하게 관리한다는 목적 달성에 기여하도록 한다.

방사성폐기물 처분장의 방사성폐기물은 방사선의 위해성과 방사성 물질의 확산으로 인한 위험성 문제가 제기되는 공간이므로, 국민들이 안전에 대하여 믿을 수 있고 발생할 수 있는 다양한 기후재난 등에 대비하기 위하여 보수적으로 기후변화 시나리오 RCP8.5를 기준으로 작성한 환경안전 위험도 지도를 분석하여 위험지역을 산출할 필요가 있다. 또한 기후변화 시나리오에 따라 위험도가 현저히 증가할 수 있는 지역의 경우에도 위험지역으로 설정하여 방사성폐기물 처분장 건축 설계 기준 등을 조정할 것을 권고하도록 하고, 철저하게 모니터링이 필요한 구역에 대한 조사와 연구 및 감시를 수행하도록 하여야 한다.

우리나라는 기후변화 리스크를 파악하고 기후변화로 인한 위험 감소를 위하여 국가 기후변화 적응대책을 마련하고 있다. 홍수·가뭄·산사태·산불 등 기후변화 현상에 대한 위험과 대응방안을 과제로 삼고 있으며 회복탄력성을 가지는 체계를 강화하고자 하고 있다(관계부처합동, 2020). 방사성폐기물의 증가와 방사성폐기물 처분장 등에 대한 국민적 신뢰가 확보되기 위해서는 불확실성을 가지는 기후위기의 현상이 발생압력을 가중시켜 발생하는 재해들에 대한 적응 전략이 앞으로 대두될 것으로 예상된다. 따라서 기후변화 시나리오와 다양한 지표를 고려하는 방사성폐기물 처분장의 기후변화 적응형 환경안전 위험도 평가 결과를 우리나라의 기후변화 적응대책과 연계하는 체계가 마련될 필요가 있다. 이에 더하여 기후재해에 대한 회복탄력성을 제공할 수 있는 시설물 및 공간 계획을 방사성폐기물 처분장 주위에 세워 기후재난의 영향을 줄이는 방안도 있다. 도시의 경우 기후변화 적응 측면에서 다양한 회복탄력성을 의미하는 리질리언스 개념을 도시 방재 패러다임으로 반영하고자 하고 있다. 공학적·생태학적·사회·생태학적 리질리언스가 적용되면서 불확실성 속의 재난에 대한 충격을 줄이고 도시의 안정성을 회복할 수 있도록 하는 요소들이 적용되고 있다(정범

선, 2016.06.30.). 이러한 리질리언스 설계 개념을 기후변화 시나리오와 방사성폐기물 처분장의 장기적 안전을 위하여 도시계획 및 부지관리에서 연계시켜, 회복탄력성과 기후변화, 방사성폐기물에 대한 정책적·제도적 연계를 수행한다면 다양한 대책 방안이 나타날 수 있을 것으로 예상된다.

2) 위험지역 내 기후변화 및 방사능 지표식물을 활용한 환경안전 모니터링 공간 조성

방사성폐기물 처분장의 환경안전 위험도 평가를 통하여 지역의 위험도 지도가 도출되면 위험도가 높게 나타나는 지역을 위험지역으로 구분하여 모니터링 대상으로 하여야 한다. 기후변화 시나리오 및 기후변화에 따른 환경생태적 지표 변화에 따라서 방사성폐기물 환경안전 위험도 시나리오를 작성하면, 시나리오별 대책을 강구함과 동시에 다수의 시나리오에서 위험도가 높게 나타나는 지역을 중심으로 위험지역을 설정한다. 위험지역은 다양한 요인에 의한 위험도가 높아 지속적인 모니터링과 관리 대책을 강구하여야 하는 필요성이 있는 곳이므로, 방사성폐기물의 노출 등과 관련한 주기적인 안전점검 및 종합적 위험도 관리 등을 강화함과 동시에 기후변화 및 방사능에 대한 지표식물을 이용한 모니터링 공간을 조성하여 위험지역에서의 관리 및 대응을 시각적으로 국민들과 공유할 수 있는 체계를 만들 것을 제안한다.

식물은 주기적으로 반복되는 생활사를 가지며 온도·강수량 등의 환경요소에 민감하게 반응하기 때문에 변화에 대한 영향을 예측하는데 적절한 지표이다. 기후변화의 경우 환경부 국립생물자원관이 기후변화의 영향과 취약성에 대한 효율적 감시·예측을 위하여 기후변화에 민감한 생물종을 선정한 국가 기후변화 생물지표가 존재한다(김선애, 2010.07.26.). 이들 중 식물 종을 선별하여 기후변화 지표식물로 활용하고, 기후변화 지표식물의 개화 시기나 분포 변화 등을 모니터링하여 기후변화가 지역 및 방사성폐기물 처분장에 미칠 영향력을 예상할 수 있을 것으로 보인다. 이뿐만 아니라 방사능 지표식물을 심어 방사성폐기물 처분장의 환경안전 영향을 직접적으로 모니터링을 할 수 있는 체계를 만들 수 있다. 대표적인 방사능 지표식물은 자주달개비로 특정 자주달개비는 방사선을 처리하게 되면 수술털색에 변형이 일어나며 이러한 유전자와 발현 특성을 바탕으로 방사선량 감지용 키트도 개발할 수 있다(충남대학교 산학협력단, 2017.02.28.). 한국원자력연구원은 애기장대를 이용하여 단순히 방사선 누출 여부가 아닌 방사선 누출 정도 및 오염 정도를 알아보는 새로운 기술을 개발하였고 방사선 안전성이 요구되는 지역에 감시자로서 활용될 수 있을 것으로 보았다(구본혁, 2012.05.15.). 이러한 자주달개비와 애기장대 등의 지표식물을 활용한다면 방사선에 민감하게 반응하는 식물들을 관리하고 주기적으로 검사를 통하여 방사선 노출 여부를 확인하면서 위험지역의 상황을 파악할 수 있다. 궁극적으로 기후변화 및 방사능 지표식물이 자라면서 안전한 환경임을 증명하는 모니터링 공간을 시각적으로 제공함으로써 위험지역에 대한 부정적 시각을 완화하고, 기후변화 적응형 방사능 모니터링이 가능한 공간으로서 사전 예방 단계에서의 활용은 물론 방사능 재난 발생 시 방사선 위해의 확산에 대해 알리는 경고자의 역할도 수행할 수 있도록 한다.

지표식물을 이용한 환경안전 모니터링 공간은 공원과 같은 국민 편익 증진 사업과 연계하여 시민들에게 삶의 질과 생활환경의 개선을 제공할 수 있도록 한다. 이를 통하여 식물을 이용한 모니터링 공간이라는 모니터링 공원이라는 주제성을 형성함과 동시에 녹색공간과의 연계를 통하여 시민들의 방사성폐기물 처분장에 대한 인식을 제고할 수 있다. 또한 지표식물을 통한 모니터링 과정 및 지표식물의 관리에 시민이 참여할 수 있는 기회를 제공한다면 환경안전을 지키는 모니터링 체계에 시민 커뮤니티 기능이 추가되면서 효과적인 관리형 거버넌스가 구축될 것이다.

(2) 방사성폐기물 처분장 환경안전 모니터링단 운영

1) 시민참여형 모니터링단 조직

방사성폐기물 처분장에서 방사성폐기물이 유출될 경우 주변 환경에 치명적인 영향을 미칠 수 있다. 따라서 방사성폐기물 처분장과 그 주변 환경에 대한 정기적인 모니터링은 필수적이라 할 수 있다. 그러나 주변 환경이 방사성폐기물 처분장에 편성되어 있는 예산이나 인력에 비해 지나치게 방대할 경우 정기적인 모니터링이 제대로 이루어지기 힘들 수 있다. 혹은, 기관에 대한 신뢰도 부족으로 주민들이 모니터링의 결과를 믿지 못할 수도 있다. 이에 시민참여형 방사성폐기물 환경안전 모니터링단의 조직을 이러한 문제점들을 해결할 수 있는 해결책으로서 제안하고자 한다.

모니터링단의 목적은 방사성폐기물 처분장의 안전관리 점검, 방사성폐기물 처분장 주변 환경에 대한 자료 확보, 시민·환경단체·학계·지방자치단체 및 정부기관 등이 연계한 협력체계 구축, 교육 및 홍보를 통한 지역민들의 방사성폐기물 처분장에 대한 거부감 완화 등이 있다.

시민참여 모니터링단을 편성할 경우, 우선 비용 효과적으로 대량의 데이터를 수집할 수 있게 되어 예산과 인력 부족의 극복이 가능해진다. 2017년 하젠 등의 연구에 따르면 영국의 환경 모니터링 연구 분야에서 시민과학 프로젝트들이 참여하여 기존 환경청 등 정부 차원에서 미처 살피지 못하던 지역에서도 수질 모니터링이 가능해졌다는 사례가 보고되었다. 이는 시민 모니터링단의 운영을 통하여 기존에 부족하였던 연구 데이터를 보완할 수 있게 된 사례이다(Jeneen Hadj-Hammou, Steven Loiselle, Daniel Ophof et.al., 2017). 방사성폐기물 처분장에 대한 다양한 요인을 모니터링하기 위하여 필요한 인력·시간 및 구체적인 데이터 수집에 대한 한계를 시민참여형 모니터링단을 조직하여 넘을 수 있을 것으로 기대한다.

또한 시민들도 모니터링에 참여한다면 방사성폐기물 처분장에 대한 안전도의 투명성과 신뢰성을 제고할 수 있게 된다. 안전도를 평가함에 있어 평가가 전문적인 영역에서만 독점되어 외부 관련자들의 관점이나 가치 등이 배제될 경우, 해당 평가결과의 타당성과 신뢰성이 떨어질 수 있다(강근복, 2006). 따라서 시민 모니터링단의 운영은 평가결과의 객관성을 높일 수 있고, 시민도 평가에 참여할 수 있다는 점을 통하여 자연스럽게

게 방사성폐기물 처분장 운영의 투명성 또한 홍보하는 결과를 가져올 수 있다. 실제로 경주시는 경주시월성 원전·방폐장 민간환경감시기구 설치 및 운영조례를 통하여 월성 원전·방폐장에 주민대표, 시민단체 추천자 등이 참여하는 민간환경감시기구를 설치·운영하며 방사선 안전에 대한 감시를 진행하고 있다. 이러한 선례를 추가적으로 분석하고 기후변화 적응형 환경안전 위험도 평가를 바탕으로 민간참여형 방사성폐기물 처분장 모니터링 시스템을 구축한다면 시민 모니터링의 기능적 선순환을 강화할 수 있을 것이다.

방사성폐기물 처분장 주변 지역에서의 모니터링 시스템에 있어 시민참여 방식이 큰 도움이 될 것으로 예상된다. 그러나 비전문가 시민만으로 구성된 모니터링단에는 한계가 있다. 2016년 순천만 시민 모니터링에 대해 분석한 연구에 따르면, 해당 모니터링 사례의 경우 계절별로 조사가 이루어지지 못하였고, 모니터링 주체가 변경되어 연속성이 결여되거나, 자료의 체계적인 관리가 미흡한 점 등의 한계점이 나타났다. 또한 표준 매뉴얼 부재로 방법 면에서 자료의 신뢰성을 확보하기 어려웠으며, 시민의 모니터링 역량강화를 위한 교육이 부족한 점이 많았고, 지역별로 모니터링 방법이 매우 상이하다는 문제점도 존재했었다(박성남, 2016). 따라서 모니터링단은 시민참여형으로 시민들이 참여할 수 있는 기회를 제공하되, 방사성폐기물 및 환경안전과 관련한 환경·생물·의학·안전 등 각종 분야의 전문가의 참여가 이루어질 수 있도록 한다. 이는 환경안전 모니터링단 시민 및 전문가 참여도를 주기적으로 확인하여 모니터링단 운영 평가에 반영하도록 한다. 또한 방사성폐기물 처분장과 관련 있는 기관·지방자치단체 등이 참여하여 모니터링 과정에서 시민들과 소통하고 잠재적 위험도를 관리할 수 있도록 하여야 한다. 시민참여 시 시민에 대한 전문가들의 교육을 강화하고 조사 매뉴얼을 확립할 수 있도록 한다면 환경안전 모니터링단 조직 및 운영을 통한 방사성폐기물 처분장의 환경안전 확보에 대한 신뢰도를 높이고 방사성폐기물에 대한 사회적 수용성을 늘릴 수 있을 것으로 기대된다.

2) 방사성폐기물 처분장 환경안전 모니터링단 모니터링 항목

방사성폐기물 처분장의 환경안전 모니터링단은 위험도 평가 및 처분장 공간 모니터링을 비롯하여 다음의 항목을 모니터링한다(표 4).

<표 4> 모니터링단 환경안전 모니터링 항목

항목	내용
위험도 평가	방사선 감시 체계 점검, 세부공간의 방사선량 확인
	방사성폐기물 저장 공간의 안전점검 체계
	방사성폐기물 저장 공간의 직원교육, 대응 매뉴얼, 관리 인력 점검
	방사성폐기물 환경안전 위험도 평가의 체계성·신뢰성 검토
모니터링 체계	기후변화 시나리오에 따른 위험지역의 환경생태적 요소 조사
	기후변화·방사능 지표식물 모니터링 공간 관리
	방사성폐기물 환경안전 모니터링 체계의 자체적 점검

III. 결 론

본 논문에서는 방사성폐기물 처분장의 장기적인 안전관리를 위해 기후변화를 반영한 지리정보체계(GIS) 기반 위험도 평가 체계와 지표식물을 활용한 환경안전 모니터링 공간의 구성을 조성할 것을 제안하였다. 이와 함께 사회적 수용성 증진을 위한 시민참여형 방사성폐기물 처분장 환경안전 모니터링단의 운영이 필요할 것으로 보았다.

본 연구는 위험도 지수의 지표 선정에 있어, 방사선 위협을 반영한 위험성, 방사성폐기물의 영향에 취약할 수 있는 요소를 반영한 취약성, 방사능 재난을 예방하거나 대응할 수 있는 적응능력의 개념의 저감성을 반영하였다.

위험성 지수 중 방사선 요인으로 방사선량을 선정하였고, 방사성폐기물 요인으로 방사성폐기물 준위 종류, 방사성폐기물 저장기간, 방사성폐기물 양을 선정하였다. 취약성 지수의 확산 요인으로 풍속 등의 기상요인과 수계의 인접 정도 및 특성을 지표로 선정하였고, 재난 요인으로는 기후성 재난과 지질성 재난의 발생 가능성을 나타낼 수 있는 지표를 선정하였다. 그리고 생태 요인으로는 생태자연도, 국토환경성평가지도, 야생동물보호구역 등을 지표로 선정하였다. 저감성 지수 중 관리 요인으로 정기 모니터링의 주기, 정기 점검의 주기, 특별 점검 여부, 직원 안전 교육 여부, 재난대응 시나리오 매뉴얼 여부 등을 지표로 선정하였으며, 지역 요인으로는 지방자치단체 방사능 관련 시나리오 매뉴얼 여부, 지방자치단체의 재정자립도, 지방자치단체 재난관리 조직-인력 운영 적절성, 지방자치단체의 방사능 관련 조례 여부 등을 지표로 선정하였다.

위와 같은 지표를 적용한 종합적 위험도 평가는 시각적 맵 형태 데이터로서 작성되어 관리 효율성을 높이고 주민들의 이해도에 도움을 줄 수 있다. 또한 위험도 평가의 활용으로 상시적인 위험요소 모니터링을 진행하며, 기후변화 시나리오를 적용하여 위험지역을 설정하여 대책을 강구할 수 있는 체계를 제안하였다. 이에 더하여 기후변화 및 방사능에 대한 지표식물을 이용한 환경안전 모니터링 공간을 조성하여 위험지역에서의 관리 및 대응을 시각적으로 국민들과 공유할 수 있도록 하였다. 마지막으로 시민참여형 모니터링단을 조직 및 운영하여 방사성폐기물 처분장의 안전관리를 점검하고, 방사성폐기물 처분장 주변 환경에 대한 자료를 확보하도록 한다. 이는 시민·환경단체·학계·지방자치단체 및 정부기관 등이 연계한 협력체계가 구축되면서 거버넌스 효과를 창출하고 교육·홍보 활동을 통해 지역민들의 방사성폐기물 처분장에 대한 거부감을 완화하고 사회적 수용성을 증진시킬 수 있을 것으로 기대한다.

본 연구에서 위험도 평가는 방사능 누출과 확산에 영향을 미치는 모든 지표를 포함하고 있지 않다는 점과 주관성에 따라 지표의 가중치가 변화하여 위험도의 값이 달라질 수 있다는 점에서 한계가 있다. 취약성 지

수에 대한 요인 및 지표 선정의 경우 인체의 방사선에 대한 취약성을 고려하여 주민들의 연령이나 어린이 수를 추가적으로 고려할 수 있는 부분이므로 본 연구에서 선정한 요인과 지표 외의 상관관계가 있는 사항을 검토할 필요성이 존재한다. 또한 위험도 값 자체의 신뢰성을 보완하기 위하여 위험도 평가의 지표 간 상관관계 및 위험도와 지표와의 관련성을 추가적으로 파악하고 적절성을 검증할 수 있는 과정을 포함시켜 연구를 추후 진행하여야 할 것으로 보인다. 지표 사이의 독립성을 검토하고 상관관계가 높은 지표들을 포함시켜 본 연구의 한계점을 개선한다면 종합적 위험도 평가와 기후변화와 재난을 고려한 모니터링 시스템을 확립시켜 방사성폐기물 처분장에 대한 안전성을 높이고 국민들의 신뢰를 얻을 수 있을 것이다.

[참고문헌]

- Alexey O. Merkushev. 2001. Karachay lake is the storage of the radioactive wastes under open sky. International Youth Nuclear Congress 2000: Youth, Future, Nuclear. Proceedings and Multimedia Presentation.
- 배형록. 2022. 국내 원전 해체방사성폐기물 발생량 예측을 통한 처분시설 운영 방안 연구. 동국대학교 석사학위 논문.
- 최성대, “경주 감포관광단지→산업단지로 변경…‘고준위방사성폐기물 전초기지’되나?”, 2020.11.29., 신아일보.
- 정종훈, “늘어나는 원전 가동…‘고준위 폐기물’처리 급한 불 됐다”, 2022.09.19., 중앙일보.
- 황의서. 2013. 방폐장 유치 주민투표의 정치·사회적 심리와 향후 정책과제. 대한정치학회보 21(1), 73-90.
- 건설교통부. 2001. 유역종합수치계획.
- 박무종, 전환돈, 정상만. 2007. 지자체별 지역 및 시설물별 안전도 평가 방안. 한국수자원학회 학술발표회 논문집, 361-365.
- 여창건, 서근순, 송재우. 2011. GIS를 이용한 도시홍수에 대한 지역안전도 평가. 한국지리정보학회지 14(3), 68-77.
- 임상규, 서보람, 최우정 외 1명. 2017.12. 재난관리 평가제도의 현황분석과 운영체계 개선. 국립재난안전연구원.
- 김동창, 박신영, 김지태, 임승현. (2022). 원자력발전소 안전성 평가를 위한 외부사건 식별 및 선별 방법 연구동향. 한국재난정보학회논문집, 18(2), 252-260.
- 정재학. 2006. 원자력시설 해체부지의 재이용을 위한 방사선학적 리스크 평가모델. 방사성폐기물학회지 4(4), 353-363.
- 정관성, 이근우. 2011. 원자력시설 해체공정 위험성 리스크 정량적 평가 모델. 한국방사성폐기물학회 학술대회 논문집, 255-256.
- 서명수, “핵폐기물처리 특별법 제정해야 방사성폐기물 정책포럼”, 2022.07.06., 중앙일보.
- 정종태, 황미정, 최희주. 2010. 방사성폐기물 처분장 운영 중 안전성 평가 체계 구축. 한국방사성폐기물학회 학술2010년도 논문요약집, 149-150.

- 김민규, 이현미, 이정미. 2011. 중·저준위 방사성 폐기물 처분장의 지진위험도 평가를 위한 지반운동스펙트럼 산정. 한국지진공학회논문집 15(1), 57-63.
- 원자력안전위원회 고시. 2021.7.13. “중·저준위방사성폐기물 처분시설의 안전성분석보고서 작성지침”.
- 이창희, 이석민, 여창건. 2006. 서울시 지역안전도 평가모형 개발연구 - 홍수재해를 중심으로. 서울시정개발연구원 2006-R-37.
- 심창섭, 홍지연. 2011. 방사능 재해에 따른 환경 및 인체 영향 분석. 한국환경정책·평가연구원 제17-254호.
- 길애경, “방사선 데이터 ‘사물인터넷’ 네트워크로 실시간 공유”, 2018.09.17., 헬로디디.
- 김보길. 2020. 방사능재난을 대비한 사물인터넷(IoT) 기반의 방사선측정기 개발. 조선대학교 석사학위논문.
- 원자력안전위원회 고시. 2019.5.10. “방사선방호 등에 관한 기준”.
- 오길중, 김우일, 강영렬 외 3명. 2013. 저농도 방사성 물질 오염 폐기물의 관리 방안. 국립환경과학원.
- 원자력안전위원회 고시. 2017.12.26. “원자로시설 부지의 기상조건에 관한 조사·평가 기준”.
- 황원태, 김은한, 정해선 외 2명. 2013. 확산계수의 모델링방법이 대기확산인자에 미치는 영향. 방사선방어학회지 38(2), 60-67.
- 원자력안전위원회 고시. 2017.12.26. “원자로시설 부지의 수문 및 해양특성에 관한 조사·평가 기준”.
- 박경우, 김경수, 고용권 외 2명. 2017. 방사성폐기물의 심층 처분을 위한 부지특성조사 방법론 해외 사례연구. 방사성폐기물학회지 15(3), 239-256.
- 이민석, 김교원. 2009. 수치해석에 의한 강우강도와 사면 안정성의 상관성 분석. 지질공학 19(1), 25-31.
- 김정석, “울진 산불, 강풍 타고 민가 향한다...3km 옆 한울원전 초비상”, 2022.03.04., 중앙일보.
- 조승한, “기후변화로 커진 산불위험, 온도 상승폭 0.5도만 줄여도 절반으로 감소”, 2021.02.24., 동아사이언스.
- 조승한, “日후쿠시마 원전 방사성폐기물, 태풍 ‘하기비스’에 떠내려가”, 2019.10.14., 동아사이언스.
- 고아라, 오재호. 2010. 기후변화에 따른 미래태풍에 관한 연구. 한국환경정책학회 학술대회논문집 2010(11), 189-189.
- 이근영, “한국, 2050년까지 초강력 태풍 영향 인구 10배 증가...세계 4번째”, 2022.05.02. 한겨레.
- 원자력안전위원회 고시. 2021.7.13. “고준위방사성폐기물 심층처분시설에 관한 일반기준”

- 채병곤, 최정해, 김유홍 외 1명. 2017. 고준위방사성폐기물 처분후보부지 조사에 고려할 구조지질학적 요소: 해외사례에 대한 고찰. 지질학회지 53(1), 207-219.
- 자연환경보전법(2022.6.10.). 제2조 제12호.
- 환경정책기본법(2022.3.25.). 제23조 제2항.
- 야생생물보호및관리에관한법률(2022.6.10.). 제33조 제1항.
- 최영준, “후쿠시마 원전 방사능에 야생동물 수명 줄어”, 2014.09.23., 동아사이언스.
- 행정안전부 보도자료. 2019.12.17. 행정안전부, 2020년 재난관리평가 예방 정책 비중 높인다.
- 지우현, “원전 사고, 종사자 안전불감증 비롯된다”, 2017.05.01., 원자력신문.
- 재난및안전관리기본법(2022.4.5.) 제34조 제5항.
- 조현철, “부산광역시 원자력안전 조례 발의”, 2020.06.21., 세계환경신문.
- 기상청. 2018. 기후변화 시나리오 활용 사례집.
- 곽현호, “온실가스 감축 없으면 21세기말 유역별 극한 강수량 70% 이상 증가”, 2022.06.14., 교통뉴스.
- 관계부처합동. 2020. 제3차 국가 기후변화 적응대책(2021~2025).
- 정범선, “리질리언스, 새로운 도시 방재 패러다임”, 2016.06.30., 도시미래신문.
- 김선애, “국가 기후변화 생물지표 100종 선정”, 2010.07.26., 이투뉴스.
- 충남대학교 산학협력단. 2017.02.28. 지표식물 이용 방사선 피해의 분자세포학적 모니터링 및 복원 시스템 구축 최종보고서.
- 구본혁, “식물 애기장대 활용 방사선 누출 확인 가능”, 2012.05.15., 서울경제.
- Jeneen Hadj-Hammou, Steven Loiselle, Daniel Ophof et. al. 2017. Getting the full picture: Assessing the complementarity of citizen science and agency monitoring data. INRA.
- 강근복. 2006. 시민참여정책평가의 개념적 특성과 실행조건. 행정논총 44(4), 429-454.
- 경상북도 경주시 조례. 2012.12.11. “경주시월성원전·방폐장 민간환경감시기구 설치 및 운영조례”
- 박성남. 2016. 순천만과 보성별교 습지보호지역의 시민 모니터링 개선방안. 전남대학교 박사학위 논문.

제7회 방사성폐기물 관리 경진대회 아이디어 및 논문 우수사례집

방사성폐기물학회장상 - 논문 2

05

방사성폐기물의 효율적 관리 방안

경주 방사성폐기물 복합처분시설 효율적 운영을 위한
주요 핵종 화학적 특성 고찰

변형진, 이유림, 정우규 울산과학기술원



요약문

경주 복합 방사성폐기물 처분시설은 현재 운영 중인 1단계 동굴처분시설과 건설 중인 2단계 처분시설로 구성되어 있다. 각 처분시설 별로 핵종별 처분농도 제한치가 있으며 경주 1단계 동굴처분시설의 핵종별 처분농도 제한치는 원자력안전위원회 고시에서 제시하는 저준위 방사성폐기물 농도 제한치와 동일하다. 1단계 동굴처분시설 처분농도 제한치는 스페인에서 운영하는 저준위방사성폐기물 처분시설의 처분농도 제한치보다 낮으며, 이는 피폭시나리오의 선량평가에서 일부 과도하게 설정된 보수성이 기인했을 가능성이 있다. 과도하게 보수적으로 설정된 처분농도 제한치는 처분시설의 효율을 감소시킬 뿐만 아니라 경제적 손실을 야기하므로 처분농도 제한치 상향이 필요한 실정이다. 본 논문에서는 처분 대상 핵종 중 주요 원자력발전소 생성 핵종인 C-14, Co-60, Sr-90 및 Cs-137을 주요 처분대상 핵종으로 선정하였으며, 경주 1단계 처분시설의 환경을 반영하여 각 핵종별 화학적 특성을 확인하였다. 조사결과 C-14와 Co-60의 경우 처분시설 환경에서 주로 침전물을 형성할 것으로 판단되며, 콘크리트 및 흙에 대해 Co-60, Sr-90, Cs-137은 일정 수준 이상의 흡착도를 가짐을 확인하였다. 이를 기반으로 현재 1단계 동굴처분시설에서 사용하는 핵종에 대한 선량평가방법을 조사결과와 비교하고, 주요 처분대상 핵종의 처분농도 제한치를 상향할 방안을 추후 진행할 필요가 있는 실험과 함께 제시하였다. 본 논문은 단순히 보수적으로 처분시설의 안전성을 평가하는 것이 아닌 실제 처분시설의 처분환경을 반영한 효율적인 안전성평가방법을 제안하고 있으며, 추후 1단계 동굴처분시설의 처분농도 제한치를 상향하는데 충분히 기여할 수 있을 것으로 예상된다. 또한 제시하는 방안은 1단계 처분시설 뿐만이 아닌 현재 건설 중인 2단계 처분시설에도 적용 가능할 것으로 기대된다.

목 차

I. 서론

II. 경주 1, 2단계 처분시설과 유사한 해외 처분시설의 인수기준

III. 경주 처분시설 처분제한농도 상향 대상 핵종 선정

1. C-14, Co-60, Sr-90, Cs-137의 중요성
2. 주요 처분 대상 핵종 포함 폐기물

IV. 경주 1단계 처분시설 내 핵종 침출 및 이동 환경

1. 침출환경
2. 흡착환경

V. 경주 1, 2단계 처분시설 폐기물 내 주요 핵종 거동 평가방법 검토

1. 선량평가 가정사항
2. 주요 핵종별 선량평가 방법

VI. 주요 핵종 및 방사성폐기물의 침출 및 흡착 특성

1. 이온교환수지에 흡착된 C-14 거동
2. 시멘트 고화체 내 Co-60, Sr-90, Cs-137 침출 및 흡착 거동

VII. 핵종 처분농도 제한치 상향을 위한 고려사항

1. C-14 화학적 거동
2. Co-60, Sr-90, Cs-137 침출 및 흡착

VIII. 시사점 및 결론

I. 서론

국내 원자력발전소를 포함한 원자력산업과 다양한 분야에서 생성되는 중·저준위 방사성폐기물은 처분드럼에 포장된 후 인수검사를 거쳐 경주 동굴처분시설에 처분되고 있다. 경상북도 경주시 문무대왕면에 건설된 방사성폐기물 1단계 동굴처분시설은 약 10만 드럼의 방사성폐기물을 처분용량으로 지하 약 100 m에 6개의 사일로형태로 건설되어, 운영 중이다. 2단계 표층처분시설은 약 12.5만 드럼의 처분 용량으로 2023년 준공을 목표로 하고 있다. 1단계 처분시설은 원자력안전위원회 고시 제2020-6호(방사성폐기물 분류 및 자체처분 기준에 관한 규정)의 동굴처분에 해당하여, 법적으로 극저준위 ~ 중준위 방사성폐기물 처분이 가능하다. 2단계 처분시설은 동고시에 따라 표층처분시설로 분류되어 극저준위 ~ 저준위 방사성폐기물의 처분이 가능하다. 그러나, 1, 2단계 처분시설의 처분농도는 표 1과 같이 크게 다르지 않고, 1단계 처분시설 농도는 원자력안전법상 저준위방사성폐기물 농도 제한치와 동일하다 [1, 2]. 즉, 1단계 동굴처분시설이 원자력안전법령상 처분이 가능한 중준위 방사성폐기물이 아닌 저준위 방사성폐기물 처분에 활용되고 있다 [3]. 1단계 처분시설 내 한정된 수용량(현재 약 25% 포화)과 처분비용(드럼 당 1,543만원)을 고려하면 처분시설의 운영 효율성과 경제성 측면에서 매우 효과적이지 못하다. 따라서, 국내 처분시설을 효율적으로 사용하려면 각 처분장의 설계목적 및 처분형태를 충분히 고려하여, 방사성핵종 별 인수기준을 상향하기 위한 노력이 필요하다.

〈표 1〉 저준위 농도 및 1단계, 2단계 처분시설 처분농도 제한치 (단위 : Bq/g) [1, 2]

핵종	원안위 고시 저준위 농도 제한치	1단계 동굴처분시설 처분농도 제한치	2단계 표층처분시설 처분농도 제한치
³ H	1.11E+06	1.11E+06	1.11E+06
¹⁴ C	2.22E+05	2.22E+05	2.22E+03
⁶⁰ Co	3.70E+07	3.70E+07	3.70E+07
⁵⁹ Ni	7.40E+04	7.40E+04	7.40E+04
⁶³ Ni	1.11E+07	1.11E+07	1.11E+07
⁹⁰ Sr	7.40E+04	7.40E+04	7.40E+04
⁹⁴ Nb	1.11E+02	1.11E+02	1.11E+02
⁹⁹ Tc	1.11E+03	1.11E+03	1.11E+03
¹²⁹ I	3.70E+01	3.70E+01	3.70E+01
¹³⁷ Cs	1.11E+06	1.11E+06	1.11E+06
전알파 핵종	3.70E+03	3.70E+03	2.56E+02

그래서 이번 연구에서는 경주 1, 2단계 처분시설과 유사한 형태의 해외 처분시설 사례 검토를 통해 경주 1, 2단계 처분시설의 핵종별 인수기준이 적절히 설정되었는지 검토하고, 경주 1, 2단계 안전성평가에서 보수적으로 평가되기 쉬운 방사성폐기물 내 주요 방사성핵종(C-14, Co-60, Sr-90, Cs-137)의 침출 및 지화학적 거동을 분석하였다. 이를 바탕으로 경주 1, 2단계 처분시설의 핵종별 인수기준 농도를 상향하기 위한 방향 및 시사점을 제시하였다. 이를 통하여 최종적으로는 처분시설의 추가 건설에 드는 막대한 비용의 지출을 막고 국내 방폐물 관리의 효율성과 안전성 향상을 목표로 하고 있다.

II. 경주 1, 2단계 처분시설과 유사한 해외 처분시설의 인수기준

경주 1단계 처분시설의 핵종 농도 제한치의 합리성을 조사하기 위해 동굴처분시설, 공학적 방벽이 있는 천층처분시설, 그리고 공학적 방벽이 없는 단순천층처분시설의 핵종 농도 제한치와 각각 비교해 보았다 [4]. 2022년 기준 경주 1단계 처분시설과 유사한 방식의 중·저준위 동굴처분시설을 운영하는 국가는 스웨덴(SFR), 핀란드(Olkiluoto 및 Loviisa) 등이 있으나, 경주 1단계 처분시설과 달리, Olkiluoto와 SFR에서는 처분농도 제한치(Bq/g)가 아닌, 처분장 내 총 핵종의 방사능량(Bq)을 기준으로 사용하고 있어 국내 기준과의 직접적인 비교가 불가능하다 [5]. 스페인의 중·저준위 방사성폐기물 처분장인 El Cabril은 공학적 방벽이 있는 천층처분방식의 처분장이다. 1단계 시설과 처분심도 및 처분형태에 차이가 있으나, 처분 대상 폐기물 준위가 중·저준위 및 극저준위인 것을 고려하여 두 처분장의 처분제한농도를 표 2에 기술하였다.

<표 2> 공학적 방벽 천층처분시설인 El Cabril의 처분농도 제한치 (Bq/g) [5]

처분제한농도(Bq/g)	1단계 동굴처분시설	표층처분시설	
		경주2단계	스페인 El Cabril
^3H	1.11E+06	1.11E+06	1.00E+06
^{14}C	2.22E+05	2.22E+03	2.00E+05
^{60}Co	3.70E+07	3.70E+07	5.00E+07
^{59}Ni	7.40E+04	7.40E+04	6.30E+04
^{63}Ni	1.11E+07	1.11E+07	1.20E+07
^{90}Sr	7.40E+04	7.40E+04	9.10E+04
^{94}Nb	1.11E+02	1.11E+02	1.20E+02
^{99}Tc	1.11E+03	1.11E+03	1.00E+03
^{129}I	3.70E+01	3.70E+01	4.60E+04
^{137}Cs	1.11E+06	1.11E+06	3.30E+05
전알파 핵종	3.70E+03	2.56E+02	3.70E+03

비교 결과, El Cabril 처분시설의 처분 유닛 기준 처분농도 제한치가 경주 1단계 처분장의 제한농도와 비슷한 수준인 것을 알 수 있다. 특정 핵종(H-3, Co-60, Ni-59, Ni-63, Nb-94, Tc-99)에서, 경주 1단계 동굴처분시설이 표층처분시설인 경주 2단계 처분시설, El Cabril 처분시설과 처분농도 제한치가 유사하게 설정되어 있다. C-14과 전알파 핵종의 경우에는, 경주 1단계 동굴처분시설이 El Cabril 표층처분시설과 유사한 처분농도 제한치를 갖고 있으며, 경주 2단계 표층처분시설은 그보다 낮은 수준이다. I-129의 경우에는, 경주 1, 2단계 처분시설의 처분농도 제한치가 모두 스페인 El Cabril 처분시설보다 상당히 낮은 수준으로 설정되어 있는 것을 확인하였다. 마지막으로 Cs-137의 경우, 경주 1, 2단계 처분시설의 처분농도 제한치가 El Cabril

처분시설보다 높게 설정되어 있으나 3배 정도 수준으로 큰 차이는 없는 것으로 판단된다. 이를 통해, 경주 1, 2 단계 처분시설이 El Cabril 처분장에 비해 처분안전성 측면에서 더욱 보수적인 환경임을 알 수 있었고, 현행 1단계 처분시설의 처분농도 제한치는 매우 엄격하게 설정된 것으로 파악되었다. 이는 경주 1단계 처분시설 농도 상향 및 핵종별 인수기준 설정 방법론 등을 검토의 필요성을 시사한다.

처분시설마다 처분농도 제한치에서 차이가 발생하는 이유는 크게 처분시설의 설계기준과 안전성 평가 방법론의 차이에서 기인되는 것으로 볼 수 있다. 1단계 처분시설의 건설이 완료되었고 2단계 처분시설도 설계가 완료되어 건설 중에 있음을 감안했을 때, 처분농도 제한치의 완화를 위해서는 가능성이 높은 핵종이동경로와 피폭시나리오를 고려해야 한다. 특히 C-14, Sr-90, Co-60, Cs-137 등의 주요 관심 핵종의 합리적인 처분농도 제한치를 구하기 위해 핵종별 침출 및 이동 경향, 생태계 내에서의 이동 및 결합 시나리오에 대한 연구가 뒷받침되어야 한다. 본 논문에서는 현재 처분시설에서 사용하는 핵종 평가기준과 실제 처분시설 환경에서 주요 핵종들의 거동을 조사한 결과를 기반으로 주요 핵종들의 처분농도 제한치 상향을 위해 고려할 조건을 제안한다.

III. 경주 처분시설 처분제한농도 상향 대상 핵종 선정

1. C-14, Co-60, Sr-90, Cs-137의 중요성

본 논문에서는 주요 처분 대상 핵종으로 C-14, Co-60, Sr-90, Cs-137을 고려하였다. C-14은 원자력발전소에서 주로 발생하는 β 선 방출 핵종으로 반감기가 5,730년으로 매우 길며 기체상으로 생태계로 누출되어 체내에 흡입될 경우 인체에 큰 영향을 주므로 중요성이 크다. Co-60, Sr-90, Cs-137은 원자력발전소에서 주로 발생하는 핵종으로 국내 인수기준 중 아래 명시한 인수기준에서 볼 수 있듯이 유일하게 침출 기준을 만족해야 하며, 'NRC, Technical Position on Waste Form, Rev1'에서도 예시로 언급하고 있다. 이 중 Co-60는 반감기가 5.27년으로 상대적으로 짧은 반감기를 가지지만 44 TBq로 specific activity가 가장 큰 핵종이므로 반감기가 짧음에도 중요한 고려 대상 핵종이다 [6].

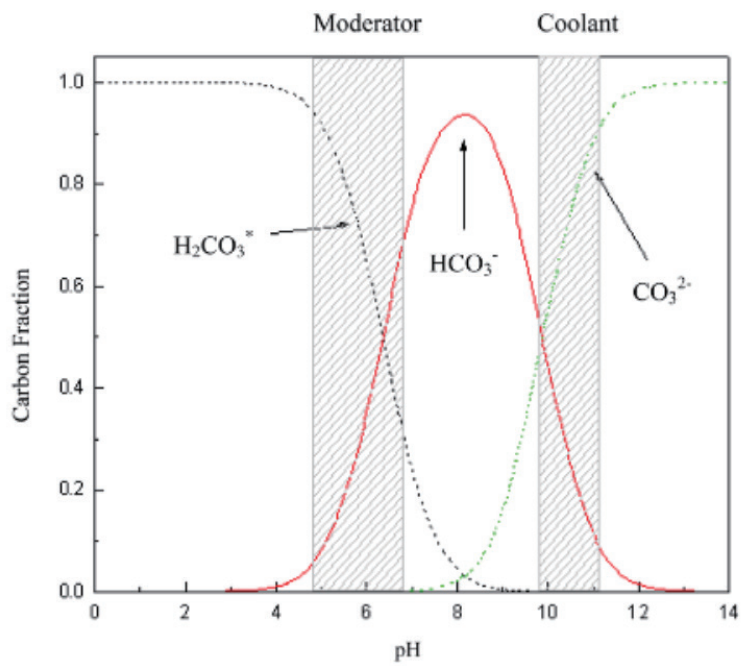
폐기물 포장물의 고형화 요건, 고화체 시험기준 [7]
폐기물 포장물의 고형화 요건 폐기물 고화체로부터 방사성핵종 누출은 처분의 안전성을 보장하기 위해 충분히 낮아야 하며, 고화체의 시편에 대한 침출지수는 Cs, Sr, Cs 핵종에 대하여 6 이상이어야 한다.

홍성욱 et al.,은 중준위 방사성폐기물 처분시설의 처분농도제한치 도출을 위해 1단계 동굴처분시설 안전성 분석보고서에서 고려된 운영 중 시나리오 중 모든 폐기물을 고려하는 저장시설 화재 사고 및 지진 사고시나리오를 고려하였으며, 폐쇄 후 안전성평가에서는 인간침입 시추 후 거주 및 인간침입 우물이용시나리오를 고려하였다 [8]. 이때 저준위 방사성폐기물 처분농도제한치 이상인 방사성폐기물들을 모두 중준위 방사성폐기물로 고려하여 방사능량을 평가하였다. 평가결과에서 앞서 언급한 주요 고려 대상 핵종 중 성능목표치를 불만족시키는 최대기여핵종은 C-14, Sr-90으로 확인되었다.

2. 주요 처분 대상 핵종 포함 폐기물 검토

주요 처분 대상 핵종 중, C-14의 경우 주로 건조 이온교환수지에 존재하며, 그림 1과 같이 pH에 따라 형태가 다르지만 대부분의 경우 중탄산이온의 형태로 존재한다 [9]. Co-60, Sr-90 및 Cs-137은 폐필터에 주로 산화물과 같은 입자성 물질로 존재하며, Co-60 및 Cs-137의 경우 폐필터 외 이온교환수지에 결합한 상태로도 존재한다.

<그림 1> pH에 따른 C 이온의 존재 형태 [9]



IV. 경주 1단계 처분시설 내 핵종 침출 및 이동 환경

1. 침출환경

경주 1단계 동굴처분시설은 해수면 기준 약 100 m 아래에 위치하며, 해당 깊이에 흐르는 지하수는 처분시설 폐쇄 후 빠른 시일 내에 사일로 내부로 포화된다. 경주 1단계 동굴처분시설의 사일로는 철근-콘크리트 구조물이며, 내부에 콘크리트 재질의 처분용기가 적재되고 폐쇄 후 화강암질 파쇄석 및 숯크리트로 뒷채움될 예정이다. 그러므로 폐쇄 후 사일로 내부가 지하수로 포화될 경우, 주변 콘크리트 물질이 일부 지하수에 용해되어 pH가 최대 13까지 증가할 것으로 예상된다. 또한 지하수는 지표수와 상이한 이온조성을 가지며, 표 3에 처분시설 부지로부터 약 5 km 정도 떨어진 지역의 두 지점(A, B)에서 채집한 지하수를 이온크로마토그래피로 분석한 이온조성을 나타내었다.

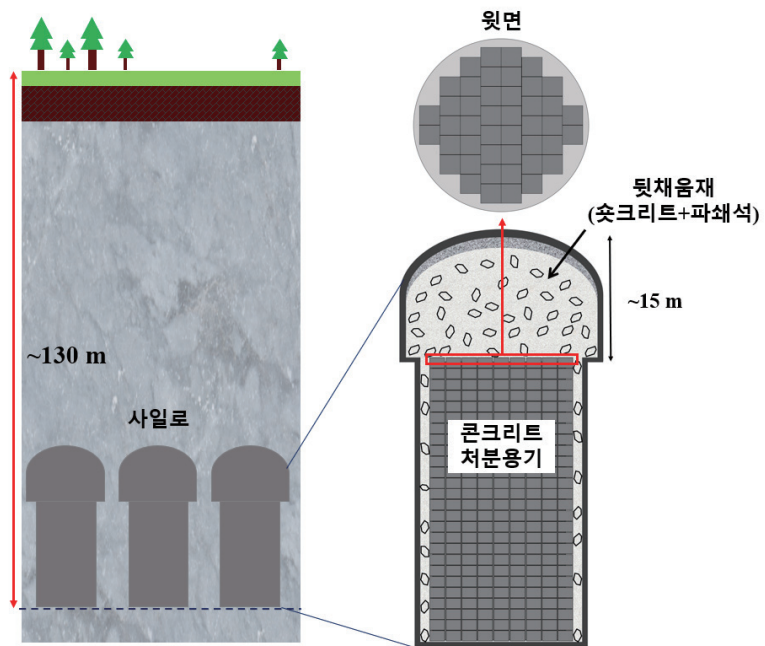
<표 3> 처분시설 부지 부근 지하수 이온구성 분석 결과

mg/l	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Alkalinity
A지점	46.4	1.48	3.39	1.2	23.96	0.17	7.51	21
B지점	46.4	1.48	3.32	1.2	24.17	0.16	7.47	20.7

2. 흡착환경

경주 1단계 처분시설 사일로 내부는 그림 2와 같이 대부분의 공간이 콘크리트 재질의 뒷채움재 및 처분용기로 채워진다. 콘크리트는 quartz(SiO₂), albite(NaAlSi₃O₈), 및 calcite(CaCO₃) 등의 미네랄 물질로 이루어져 있으므로 핵종이 흡착될 수 있는 조건이다. 공학적 방벽을 벗어나면 화강암 및 토양으로 구성된 천연방벽이 있으며, 천연방벽에 의해서도 누출된 핵종의 흡착이 발생할 수 있다. 핵종의 흡착은 핵종이 생태계로 누출되는 시간을 지연하는 효과를 가지며, 해당 핵종 지연 효과를 모델링에 반영하는 것을 고려할 필요가 있다.

<그림 2> 경주 1단계 동굴처분시설 사일로 내부 모식도



V. 경주 1, 2단계 처분시설 폐기물 내 주요 핵종 거동 평가방법 검토

1. 선량평가 가정사항

본 논문에서는 1단계 동굴처분시설의 안전성분석보고서가 비공개이므로 1단계 처분시설과 비슷한 가정 및 피폭시나리오를 사용했을 것으로 예상되는 2단계 표층처분시설의 안전성분석보고서를 참고하였다. 2단계 처분시설의 안전성분석보고서 공개본 6.4절에 명시된 피폭시나리오에서는 포장물은 폐쇄 후에는 방벽 기능을 상실하며, 처분고 콘크리트의 열화는 연속적인 열화가 아닌 일정 기간동안 건전성을 유지하고 이후 완전 열화된다고 가정한다. 누출된 핵종은 흡착과 확산에 의해 공학적 방벽에서 불포화대와 암반으로 누출되고 암반에서 핵종은 지하수 유동경로를 따라 이동하여 생태계로 도달하는 것을 기본 가정으로 한다 [2].

생태계 평가시 다음과 같은 가정을 적용한다: 1) 지하수와 관련된 구획내의 핵종 농도는 구획에서 완전혼합을 가정한다, 2) 구획간 또는 구획내의 핵종들의 전달/이동률은 연간 평균값 사용한다, 3) 보수적으로 구획내에서 생물학적 섭취에 의한 핵종의 고갈 등 농도의 변화는 없으며 먹이사슬에서 핵종전이는 정상상태를 유지한다, 4) 생태계의 현재 조건과 결정집단의 생활양식은 평가기간동안 변하지 않는다, 5) 음식 섭취 준비과정에서 일어나는 핵종농도 변화는 없다, 6) 평가는 피폭이 최대치에 이를 때까지 수행한다. 6.4절에는 여러 피폭 시나리오를 명시하고 있지만 본 논문에서는 성능목표치에 가장 큰 영향을 주는 인간침입시나리오를 주요 대상으로 한다 [2].

2. 주요 핵종별 선량평가 방법

C-14 섭취로 인한 내부피폭에서 피폭을 유발할 수 있는 기체의 형태로 이산화탄소와 메탄을 고려한다. 시멘트 고화처리된 방사성폐기물에서 발생하는 이산화탄소는 고화시멘트 조건에서 방출되지 않는 현실을 반영하여 피폭선량 평가에는 적용하지 않는다. 메탄은 토양층에 있는 미생물 등에 의해 이산화탄소로 산화되는 현상을 적용한다. 인간침입시나리오에서는 사일로에 직접 시추가 진행되어 사일로 내부의 핵종이 기체 및 액체상으로 호흡, 외부 피폭, 섭취(토양, 농축산물)의 피폭경로를 가지는 것을 가정한다. 섭취로 인한 선량평가를 위해 C-14은 시추에 의해 외부 유출될 경우 광합성, 동물의 섭취 등의 순환경로를 고려하여 생태계 평가를 같이 진행한다. 선량평가 결과 모든 시나리오에서는 C-14이 지배적인 영향을 끼치는 것으로 확인된다. 2단계 안전성분석보고서를 기준으로 우물이용시나리오가 가장 높은 C-14에 의한 피폭선량을 나타

낸다. Co, Sr, Cs의 경우 인간침입시나리오 중 폐쇄 후 시추 혹은 시추 후 거주시나리오에서만 고려가 되며 우물이용시나리오에서는 고려되지 않는다. 이는 C-14에 비해 작은 반감기 및 유동성에 의한 것으로 판단된다 [2].

VI. 주요 핵종 및 방사성폐기물의 침출 및 흡착 특성

1. 이온교환수지에 흡착된 C-14 거동 검토

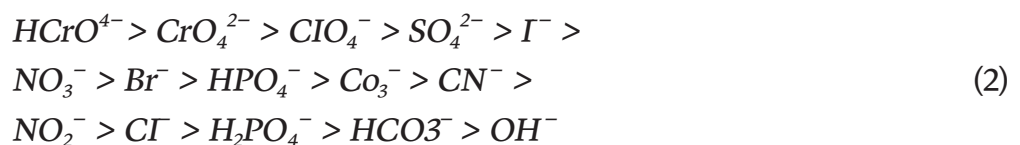
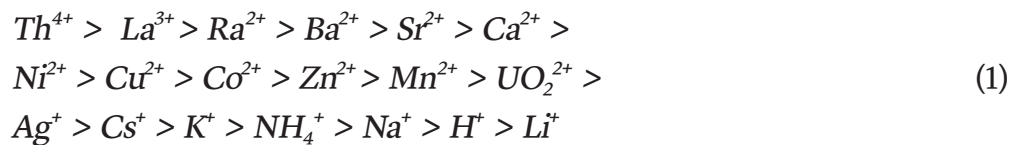
(1) 이온교환수지 내 HCO₃⁻ 흡착도

Seung-chul Park et al. 은 주변 이온조성에 따른 이온교환수지 내 C-14의 흡/탈착 거동을 실험하였으며, 이때 사용한 이온교환수지는 양이온교환수지(IRN-77)과 음이온교환수지(IRN-78)가 섞인 IRN-150으로 각 이온교환수지의 특성을 표 4에 나타내었다 [9].

<표 4> IRN-150 이온교환수지 특성 [9]

	양이온교환수지(IRN-77)	음이온교환수지(IRN-78)
이온 형태	H ⁺	OH ⁻
작용기	-SO ₃ H	-CH ₂ N(CH ₃) ₃ OH
실제 밀도(wet)	1.2 g/cm ³	1.1 g/cm ³
Bulk밀도	690 g/L (IRN-150)	
유효 사이즈	0.5 mm	0.55 mm
최대 운영온도	120℃	60℃
총 교환용량	1.9 eq/L (H ⁺)	1.2 eq/L (OH ⁻)
그램 당 부피	1.25 ml/g-dry	1.51 ml/g-dry

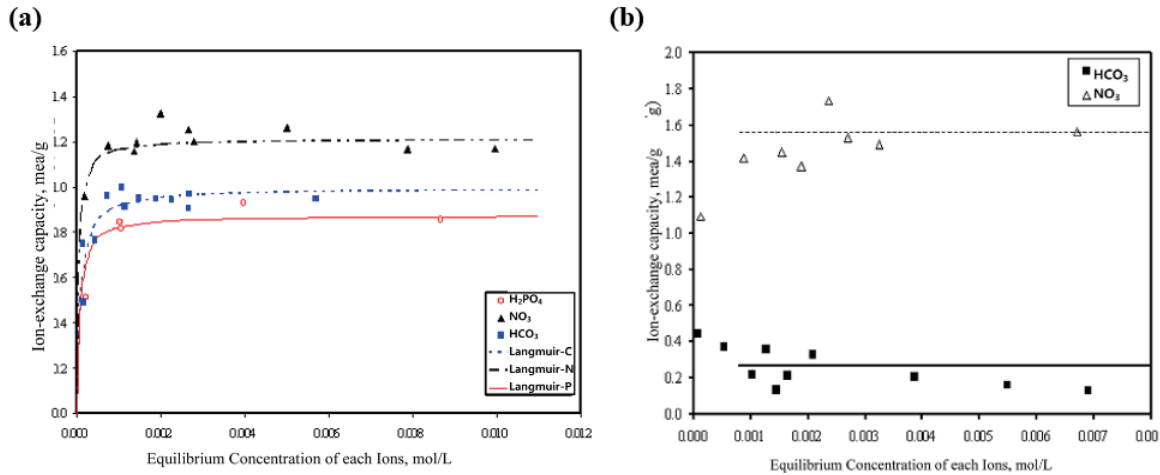
이온교환수지에서 이온교환에 영향을 주는 요소는 1) 교환 이온의 전자가수, 2) 물 및 수용액 내 이온 농도, 3) 이온 교환물질의 물리적 및 화학적 특성이다. 이는 원자번호가 클수록, 교환될 이온의 electric charge가 클수록 이온교환 선호도가 증가함을 의미한다. 일반적으로 알려진 양이온 및 음이온에 대한 선호도는 다음과 같다 [10, 11]:



IRN-150 이온교환수지를 NO₃⁻, HCO₃⁻, H₂PO₄⁻를 각각 녹인 수용액에 넣어 30℃ 온도에서 음이온 흡착도를 실험한 결과 그림 3과 같이 NO₃⁻가 가장 높은 흡착력을 가짐을 확인하였다. 같은 온도 조건에서 단일

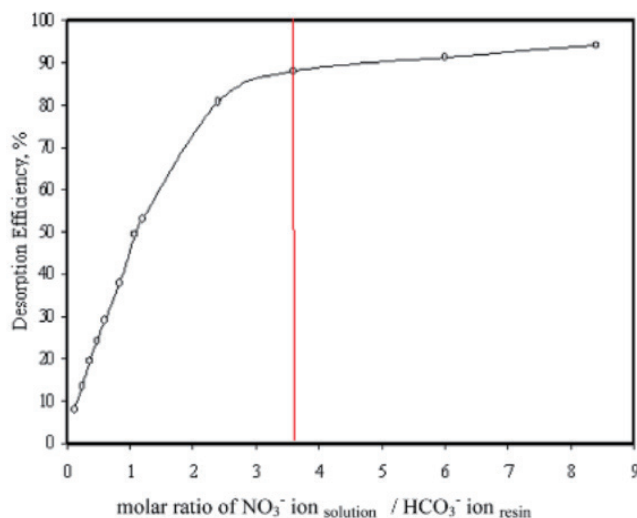
이온 시스템이 아닌 NO_3^- & HCO_3^- binary 시스템에서 IRN-150 음이온 흡착 실험을 진행한 결과 앞선 결과와 마찬가지로 NO_3^- 의 흡착력이 우세함을 확인하였다.

<그림 3> IRN-150 이온교환수지 (a) 단일 이온별 흡착도, (b) HCO_3^- & NO_3^- binary 시스템 내 흡착도 [9]



기존에 흡착된 HCO_3^- 의 탈착 정도를 확인하기 위해 NaNO_3 및 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ stripping 용액을 사용하였다. NaNO_3 stripping 용액의 경우 그림 4와 같이 $\text{NO}_3^-/\text{HCO}_3^-$ 의 비율이 3.5가 되었을 때 약 90%의 HCO_3^- 가 탈착됨을 확인하였다. 그러나 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ stripping 용액의 경우 실험 전/후의 탄소 농도의 변화가 없었다. 이는 이온교환수지의 음이온 선호도를 고려하였을 때 탈착이 일부 발생했지만 pH가 최대 2까지 감소한 결과를 반영하여 탈착된 HCO_3^- 이온들이 CO_2 로 변환되어 빠져나갔을 것으로 추측된다. 해당 연구 결과는 이미 이온교환수지에 흡착된 물질이 주변 이온조성에 따라 외부로 빠져나갈 수 있음을 의미하며 처분 시설 내 이온 조성이 핵종 누출에 중요함을 의미한다.

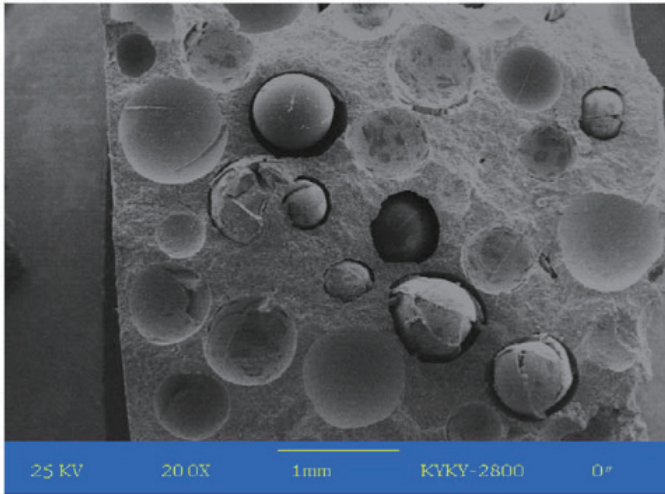
<그림 4> NO_3^- 이온의 농도에 따른 IRN-150에 흡착된 HCO_3^- 이온의 탈착률 [9]



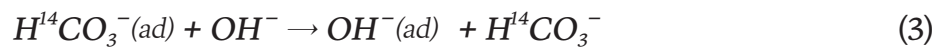
(2) 페이온교환수지 시멘트 고화체 내 C-14 침출 거동 검토

시멘트는 방사성폐기물 고화 매질로서 주로 쓰이며, 페이온교환수지 또한 시멘트를 고화 매질로 하여 처리할 수 있다. 이때 시멘트 고화는 1) 화학적 고정, 2) 물리적 흡착, 및 3) 물리적 캡슐화의 기능을 가진다. 붕산 폐액과 같은 폐기물은 시멘트 고화 시 시멘트 수화물에 영향을 주지만, 이온교환수지를 고화하는 경우 이온교환수지가 시멘트의 수화 및 수화 생성물에 영향을 주지 않는 것이 확인되었다. 그러나 Junfeng Li & Jianlong Wang의 연구에서 시멘트 고화체 내 페이온교환수지는 그림 5와 같이 시멘트와 화학적 결합을 하지 않는 것으로 확인되었다. 이는 시멘트는 단순히 이온교환수지를 외부로부터 차단하는 캡슐화의 기능만 하는 것을 의미한다 [12].

<그림 5> 포틀랜드 시멘트 고화체 내 페이온교환수지 SEM 사진 [12]



R. Dayal & E. J. Reardon은 시멘트가 지배적인 환경에서 C-14의 거동을 연구하였으며 이온교환수지와 시멘트 그라우트 사이의 반응식을 계산하였다 [13]. 시멘트 그라우트가 있는 공극 내의 pH는 12 이상으로 강염기 환경이 조성되어 OH⁻ 이온이 지배적이며, 이로 인해 이온교환수지에 흡착된 HCO₃⁻ 이온이 식(3)과 같이 탈착된다 [13]. 해당 반응은 HCO₃⁻ 이온과 OH⁻이온의 농도가 평형에 도달할 때까지 지속된다.



수지에서 탈착된 HCO₃⁻ 이온은 공극수 내 강염기 환경으로 인해 식(4)와 같이 탄산이온과 수소이온으로 분리된다.



레진에 흡착되어 감소한 OH⁻ 이온에 의해 portlandite (Ca(OH)₂)가 용해되어 공극수를 식(5)를 따라 OH⁻로 재포화 시킨다.



portlandite의 용해로 인해 생성된 Ca^{2+} 과 식(4)에 의해 분리된 CO_3^{2-} 은 식(6)을 따라 탄산염을 형성한다.



R. Daal & E. J. Reardon은 추가적으로 지하수 유속이 C-14의 침출량에 미치는 영향을 확인하는 실험을 진행하였다 [13]. 그림 6과 같이 C-14 포함 이온교환수지를 시멘트 고화 후 고화체 윗면에서 지하수 유속에 의해 C-14의 침출이 발생하도록 설계하였다. 또한 지하수 유입구와 유출구를 제외하고 장치를 밀폐하여 C-14가 CO_2 로 가스화하여 유출되는 것을 방지하였으며 외부 공기가 유입되는 것을 방지하였다.

<그림 6> 지하수 유속에 따른 C-14 침출 측정 실험장치 설계도 [13]

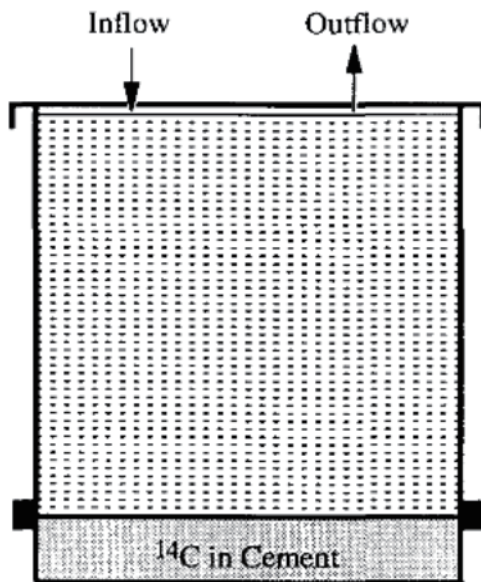


표 5에 유속에 따른 pH 변화와 C-14의 침출량 결과를 나타냈다. 결과로부터 정적 상태 및 느린 유속 조건에서는 Ca(OH)_2 의 용해가 활발하여 알칼리성 환경이 조성되고, 식(6)의 반응으로 인해 C-14의 침출량이 검출하한 미만으로 관측되었다. 그러나 높은 유속 조건에서는 유속에 의해 Ca(OH)_2 가 공극수 내에 충분히 용해되지 못하여 알칼리성 환경이 조성되지 않아 pH가 7.5이며, 이로 인해 공극수 내 CaCO_3 가 용해되어 침출수 내 C-14이 검출되었다. R. Daal & E. J. Reardon의 연구결과는 이온교환수지 내 흡착된 C-14은 시멘트 고화체 내에서 강알칼리성 환경으로 인해 용해되지 않고 고체상으로 존재하지만, 지하수의 유속에 따라 용해될 수 있음을 의미한다.

<표 5> 유속에 따른 시멘트 고화체 내 C-14 침출량 [13]

Flow Rate (mL/s)	pH ^a	Incremental Fractional Release Rate ^a (/cm ² · s)
6.3 × 10 ⁻³ (High Flow)	7.5	3.9 × 10 ⁻¹¹
6.7 × 10 ⁻⁴ (Low Flow)	8.9	^b
Static (Zero Flow)	12.6	^b

^aAt steady-state.

^bCarbon-14 activity levels close to detection limit.

(3) C-14의 생태계 누출 및 거동 평가 검토

스웨덴의 SKB(the Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company)에서는 SFR(the Swedish Final Repository for Radioactive Waste)의 운영허가 연장을 위해, SR-PSU 프로젝트를 진행하고 있다. SR-PSU의 목적은 전체 SFR들에 대한 장기적 방사선적 안전성 평가 및 관련 규제에 대한 만족여부 판단이다. 이를 위해 세부적인 안전성 분석과 스웨덴 방사선 안전청이 제시하는 관련 규제에 대한 평가를 수행한다. 평가 대상인 SFR 1과 SFR 3은 경주 1단계 동굴처분시설과 같은 동굴식 처분시설로, 해수면으로부터 60 m 아래에 다수의 처분터널로 구성된다. 경주 처분시설 주변 암반은 SFR들과 마찬가지로 화강암 및 화강섬록암이 지배적이므로, SR-PSU의 안전성 평가를 위한 생태계 모델 [14]은 경주 1단계 동굴처분시설의 안전성 평가에 적용하기 적합하다고 판단된다. SKB의 안전성 평가는 정상조건 시나리오 안전성평가, 비정상조건 시나리오 안전성평가, 거주자 시나리오 안전성평가로 구성된다. 이 때 폐쇄 후 인간침입을 고려한 거주자 시나리오 안전성평가를 중점적으로 분석하였다 [15].

SKB 생태계모델에서 C-14의 거동은 Forsmark 환경에 대하여 안전성 평가에서 중요하다고 확인된 생물권 구성요소를 포함한 육상 생태계에 대한 개념 모델을 따른다. SKB 육상 생태계모델은 지하수와 지층, 지층과 지층, 지층과 작물, 대기와 작물 사이의 핵종 이동을 묘사하며 습지 생태계모델과 농지 생태계모델로 분류된다. 이 때 폐쇄 후 안전성평가에서 C-14의 중요성이 대두되는 SKB 거주자 시나리오(국내에서는 인간침입 우물시나리오로 분류)의 평가를 위해 농지 생태계모델을 중점적으로 조사하였다. 농지 생태계모델에서는 상부 토양에서 산화된 불포화대를 경작 토양 생리활성층으로 보고 거기에서의 핵종 거동을 관찰한다. SKB에서는 사일로의 pH는 C-14 보유 폐기물의 미생물의 분해가 거의 일어나지 않는 수준이라고 보고 메탄 가스로서의 C-14의 방출이 지배적인 수송 경로가 되지 않는다고 판단한다. C-14은 처분시설로부터 생태계로 지하수를 통해 유출되는데, 이때 C-14의 형태는 유기물의 형태(dissolved methane, acetate and formate)로 존재한다. 지하수에 유기물 형태로 존재하던 C-14은 생태계로 방출되고 거주지역에서 지하수를 우물 등

을 통해 관개수로 사용하여 경작 토양 생리활성층으로 이동한다. 토양으로 이동된 C-14은 광물화되어 토양 내 공극수에 무기물의 형태(호기성 조건에서 CO₂, 그리고 혐기성 조건에서 CO₂ 혹은 CH₄)로 변환된다. 이후 경작 토양 내 C-14은 거주자에게 영향을 줄 수 있는 생태계로 두 가지 경로를 통해 방출되는데 하나는 탈기현상이며, 다른 하나는 식물의 호흡 현상이다. 첫째로 탈기 현상은 토양 공극수 내 무기 C-14이 CO₂의 형태로 대기로 방출되는 것을 의미한다. 둘째로 식물의 호흡 현상은 대기로 방출된 C-14 기체가 식물의 호흡을 통해 식물로 흡수되는 현상을 의미한다. 이후 식물이 보유한 C-14을 거주자가 섭취하거나 낙엽이나 비료 등을 통해 다시 대기로 방출되어 지속적으로 순환된다.

2. 시멘트 고화체 내 Co-60, Sr-90, Cs-137 침출 및 흡착 거동 실험

(1) 침출시험 시멘트 고화체 제작

본 논문에서는 Co, Sr, Cs 핵종의 침출거동을 실험하고자 각각의 핵종을 포함한 시멘트 고화체를 제작하였다. 시멘트는 아세아 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 몰탈 조성으로 제작하기 위해 KSL ISO 679 규격의 표준사를 사용하였다. 방사성핵종인 Co-60, Sr-90, Cs-137은 실험실에서의 취급이 어렵고 실제 방사성 폐액을 구하기가 어렵기 때문에 동위원소 시약인 Co(NO₃)₂, Sr(NO₃)₂, 그리고 Cs(NO₃) (Sigma-Aldrich, USA)를 사용하였다. 몰탈 몰드의 크기가 지름 5 cm, 높이 10 cm인 점을 반영하여 각 고화체 시편 내 핵종의 농도가 10 mmol이 되도록 시약을 섞어 몰탈을 제작하였다. 시멘트 몰탈은 28일 양생하였으며 양생 이후 각 시편마다 지름과 높이를 측정하여 기록하였다. 각 시편별 핵종 농도 및 규격을 표 6에 표기하였다.

<표 6> 시멘트 고화체 시편별 농도 및 규격

	Co	Sr	Cs
농도(mol)	10E-3		
지름(cm)	4.99	5.02	5.01
높이(cm)	9.92	10.07	10.03
겉면적(cm ²)	194.59	198.25	197.29

(2) ANS 16.1 침출시험법

경주 1단계 동굴처분시설 인수기준에서 명시하는 침출시험법은 ANS 16.1로 탈염수를 침출수로 사용하도록 한다. ANS 16.1에서는 침출 실험 시 화학적 및 구조적으로 건전한 용기(HDPE, PE 등)를 사용하도록 하며, 침출수, 침전물 및 strip 용액 내 핵종의 농도를 전부 고려한다. 침출 실험 시작 전 시편과 용기의 무게를 측정하여 실험 후 침출수의 증발량을 확인해야 하며, 시편을 30초 동안 탈이온수에 담근 후 해당 용액 내 침출량을 전체 침출량에 포함시켜야 한다. 침출 실험은 최소 5일동안 진행하며 24시간 간격으로 침출수를 교환

한다. 침출수 교환시기마다 샘플을 채집 후 24시간이 지난 용기를 1 vol% HNO₃ 산으로 18시간동안 strip하여 용기 내에 흡착된 핵종의 농도를 측정한다. 실험 후, 시간에 따른 누적 침출량을 계산하고 선형회귀법을 통해 기울기 (m)을 계산하여 유효 확산계수(De)를 식 (7)과 같이 계산한다. 유효 확산계수를 통해 침출지수를 식(8)과 같이 계산할 수 있다. 이때 β는 1.0 cm²/s의 고정 상수이다 [16].

$$D_e = \frac{\pi}{4} m^2 \quad (7)$$

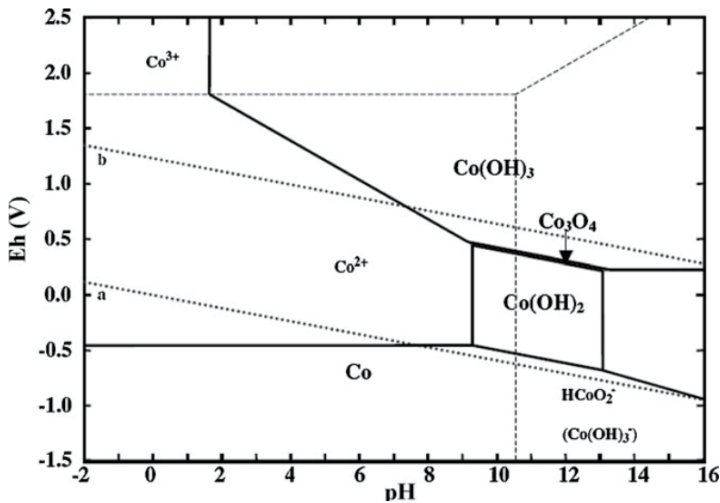
$$L = \log \left(\frac{\beta}{D_e} \right) \quad (8)$$

(3) Co, Sr, Cs 침출지수 측정 실험

1) Co 시멘트 고화체

Co의 침출 지수는 17.45이며 상응하는 유효 확산계수는 3.88E-18 cm²/s이다. 침출실험 후 모든 침출수는 pH의 범위가 11.17~11.61이며, 육안상 확인되는 침전물은 없었다. Co 핵종의 침출률은 매우 낮아 5일동안 누적 침출량은 전체 Co 농도의 5.3E-4%이며, 이는 그림 7과 같이 시멘트의 용해로 인해 조성된 강알칼리성 환경에 의해 대부분의 Co 이온이 Co(OH)₂ 형태로 시멘트 고화체 내에 침전되어 발생한 것으로 판단된다.

<그림 7> Cobalt-H₂O 시스템에서의 Pourbaix diagram [17]

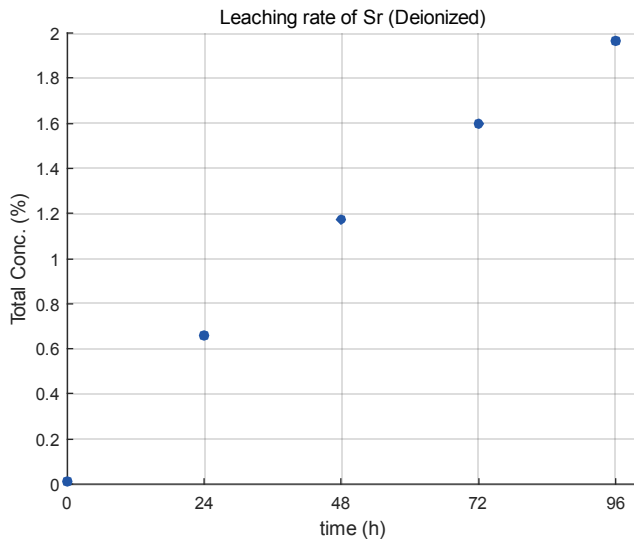


2) Sr 시멘트 고화체

ANS 16.1 침출실험 결과 Sr의 침출 지수는 9.80이며, 상응하는 유효 확산계수는 1.58E-10 cm²/s이다. 침출 실험 후 침출수의 pH 범위는 11.19~11.54로 강알칼리성 환경이며 육안상 확인된 침전물은 발견되지 않았다. Sr 핵종의 5일간 누적 침출량은 전체 농도의 약 2%이며 그림 8과 같이 그래프의 기울기가 양의 값으로 수렴하기 위해서는 장기간의 침출 실험이 필요해보인다. 그러나 일반적인 콘크리트의 투수성이 약 1E-10 cm/

s 수준인 점을 반영하면 시멘트 내부의 핵종이 지름 5 cm인 시멘트 몰탈을 관통하여 침출되기 위해서는 약 1580년의 시간이 소요된다. 이는 5일 동안 침출되는 핵종은 시멘트 고화체 겉표면에서 침출됨을 의미한다.

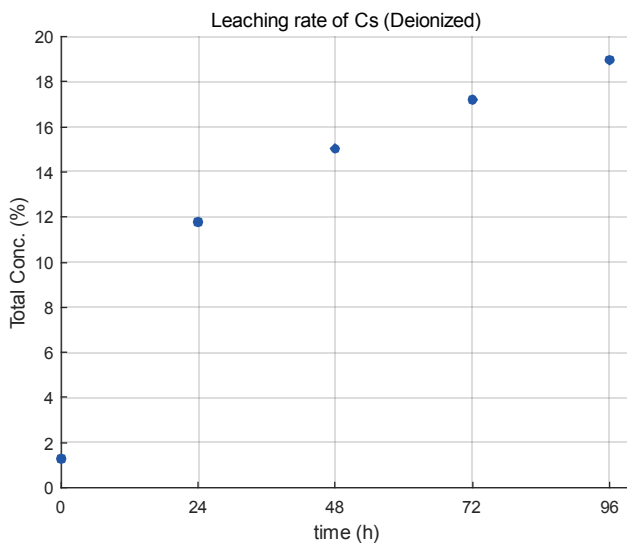
<그림 8> 탈이온수 조건에서 5일 동안 Sr의 누적 침출량



3) Cs 시멘트 고화체

Cs 핵종의 침출 지수는 계산 결과 8.33이며, 상응하는 유효 확산계수는 $4.80\text{E-}9 \text{ cm}^2/\text{s}$ 이다. 이전 실험과 유사하게 침출수의 pH 범위는 11.23-11.55로 강알칼리성 환경이며 침전물은 관찰되지 않았다. Cs의 침출속도는 Co, Sr, Cs 중 가장 높으며 5일 동안 전체 농도의 약 19%가 침출되었지만 그림 9에서 나타난 것처럼 누적 침출량이 수렴하는 형상을 보인다. 그러나 앞서 언급한 Sr 고화체와 마찬가지로 5일 동안 침출된 Cs의 농도는 고화체 겉표면 부근의 농도로 판단되며 전체 핵종이 침출되는데는 오랜 시간이 소요될 것으로 예상된다.

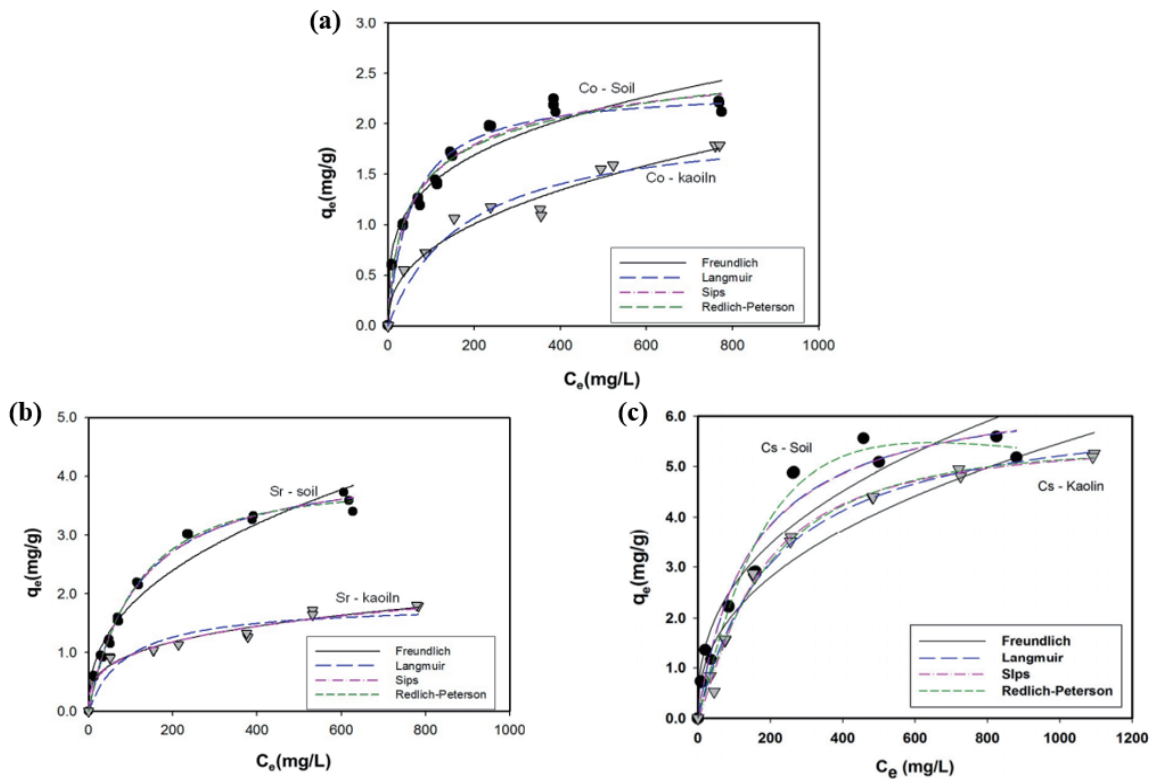
<그림 9> 탈이온수 조건에서 5일 동안 Cs의 누적 침출량



(4) Co, Sr, Cs 흡착 거동 검토

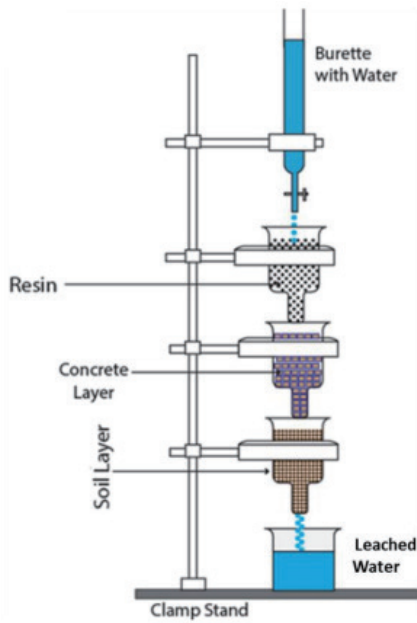
Kyeong Ho Cheon et al.은 자연토양 및 카올린에 대한 Co, Sr, Cs의 흡착 특성을 연구하였으며, $\text{Co}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$, 그리고 CsNO_3 를 사용하여 흡착실험을 진행했다 [18]. 해당 연구에서는 pH에 따른 금속이온의 존재형태를 확인하기 위해 MINEQL+ version 4.0을 이용하였다. 모델링 결과 Co는 pH 7 이상에서 $\text{Co}(\text{OH})_2$ 형태로 침전되며 Sr와 Cs는 전 pH 영역에서 이온 상태로 존재함을 확인하였다. 이를 반영하여 핵종이 포함된 수용액의 pH를 5.5로 유지하였으며 실험결과 그림 10에서 확인할 수 있듯이 $\text{Cs} > \text{Sr} > \text{Co}$ 순서로 토양에 잘 흡착됨을 확인하였다.

<그림 10> (a) Co, (b) Sr, (c) Cs 핵종의 토양 및 카올린에 대한 흡착 정도 [18]

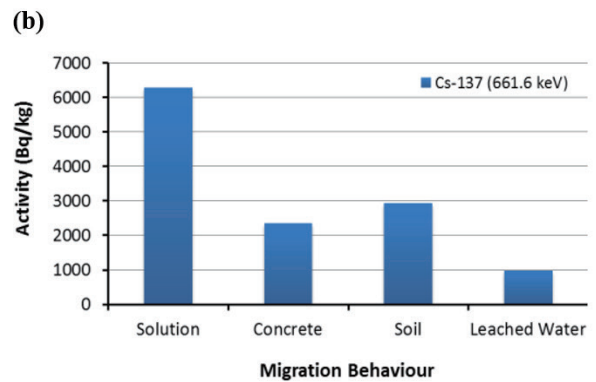
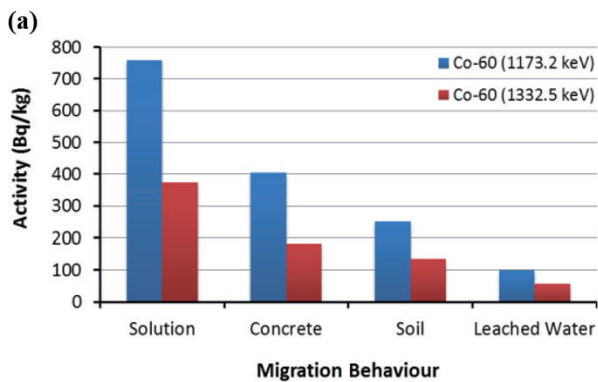


M. Shamsuzzaman et al.은 이온교환수지에 흡착된 Co, Cs이 물을 흘렸을 때 이온교환수지에서 탈착되어 콘크리트, 흙에 흡착되는 정도를 보고자 그림 11과 같이 설계를 하여 실험을 진행하였다 [19]. 실험 결과 그림 12과 같이 흐르는 물에 의해 이온교환수지에서 탈착된 Co, Cs은 콘크리트와 흙에 일정량 흡착되는 결과를 확인하였다. Co는 이온교환수지 > 콘크리트 > 흙의 순서로 흡착이 되어 있는 반면 Cs의 경우 이온교환수지 > 흙 > 콘크리트의 순서의 흡착도를 보인다.

<그림 11> Co, Cs의 콘크리트, 흙 흡착도 실험 설계도 [19]



<그림 12> (a) Co, (b) Cs의 흡착도 실험 결과 [19]



VII. 경주 1, 2단계 처분시설 처분농도 제한치 상향을 위한 고려사항

1. C-14의 화학적 거동

V장에서 언급한 바와 같이 경주 1, 2 단계 처분시설 안전성분석보고서의 피폭 시나리오에서는 C-14이 주로 기체상인 이산화탄소 및 메탄의 형태로 존재한다고 가정하고 있으며, 이는 생태계에서 기체상으로 존재하는 C-14이 중요함을 의미한다. 그러나 VI장에서 조사한 결과로부터, 방사성폐기물 내에 존재하는 C-14은 기체상으로 존재하기 어렵다고 판단된다. 따라서, 경주 1, 2단계 처분시설 내 C-14 핵종의 처분농도제한치를 상향하기 위해서는 아래의 사항을 고려하는 것이 필요하다.

(고려사항) 1, 2단계 처분시설 안전성 평가에서 이온교환수지에 흡착된 C-14의 기체상 발생 감소 가능성

(근거 1) C-14은 주로 폐이온교환수지 내에서 중탄산이온 형태로 흡착

(근거 2) 강알칼리 환경인 처분환경에서 C-14은 중탄산이온 형태로 지하수에 용해되는 비율 높음

(근거 3) 시멘트 포화 지하수 내 Ca^{2+} 에 의해 C-14은 $\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$ 형태로 침전

(근거 4) 대부분의 C-14은 처분환경에서 침전물로 존재하며 일부 C-14이 중탄산이온으로 지하수에 용해되어 존재할 것으로 예상됨

따라서, 사일로 직접 시추공이 뚫려 핵종이 누출되더라도 적은 기체상의 C-14에 의해 적은 피폭선량이 예상되며, 이를 기반으로 처분시설의 C-14 처분농도 제한치 상향을 고려해볼 수 있음

(추가 고려사항) 일부 C-14의 경우 중탄산이온으로 지하수 내에 용해되어 있을 가능성이 있어 지하수가 대기 중으로 노출시 $^{14}\text{CO}_2$ 기체 발생량 확인 필요

2. Co-60, Sr-90, Cs-137의 화학적 거동

본 논문에서는 Co, Sr, Cs을 포함한 시멘트 고화체의 침출지수를 ANS 16.1 침출실험을 통해 도출하였으며, $\text{Cs} > \text{Sr} > \text{Co}$ 순서로 침출속도가 빠름을 확인하였다. 그러나 이는 콘크리트의 낮은 투수율을 고려하였을 때 시멘트 고화체 겉면에 존재하는 핵종 농도에 대한 결과이며 실제 고화체 내 핵종의 침출시간은 매우 오랜 시간이 소요될 것으로 예상된다. 따라서, 경주 1, 2단계 처분시설 내 Co-60, Sr-90, Cs-137 처분농도제한치를 상향하기 위해서는 아래의 사항을 고려하는 것이 필요하다.

(고려사항) 1, 2단계 처분시설 내 시멘트 고화체의 Co-60, Sr-90, Cs-137 핵종이 전부 침출되어 생태계로의 누출까지 걸리는 속도가 각 핵종의 반감기를 상회하는 가능성

(근거 1) ANS 16.1 침출시험 진행시 침출되는 핵종은 시멘트 고화체 겉표면에 존재하는 핵종으로 판단됨

(근거 2) 콘크리트의 투수율이 약 $1E-10$ cm/s정도 수준임을 고려하면 지하수가 고화체를 관통하는데 약 1,580년이 소요됨

(근거 3) Co는 pH 7 이상의 조건에서 $Co(OH)_2$ 의 침전물을 형성함

(근거 4) 콘크리트 및 흙에 대해 Co, Sr, Cs는 일정 수준 이상의 흡착도를 가짐

따라서, 인간침입시나리오에 의해 사일로에 직접적으로 시추공이 뚫려도 상당량의 핵종이 시멘트 고화체 내부에 존재하여 적은 피폭선량 결과가 예상되며, 이를 기반으로 핵종의 처분농도 제한치 상향을 고려해볼 수 있음.

(추가 고려사항) 시멘트 고화체 내 Co-60, Sr-90 및 Cs-137이 실제 처분시설 처분환경에서 어떠한 침출거동을 보이는지 실험을 통해 확인할 필요가 있음

VIII. 시사점 및 결론

주요 처분대상 핵종인 C-14의 핵종 이동 시나리오를 검토한 결과 주로 기체형태의 C-14(이산화탄소, 메탄)을 고려하고 있다. 가장 보수적인 피폭시나리오인 인간침입시나리오에서는 사일로에 직접 뚫는 시추공으로 인한 핵종의 직접적인 노출을 가정하며, 시추과정에서 나오는 Co, Sr, Cs와 시추 후 기체로 노출되는 C-14이 선량평가 결과에 큰 영향을 미친다. 그러나 C-14은 실제 처분시설 환경에서 대부분 침전물을 형성하므로 적은 양의 C-14만이 중탄산이온을 형성하여 지하수에 녹아있을 것으로 예상된다. 그러므로 시추공을 통해 누출되는 기체상의 C-14의 양이 기존의 선량평가결과보다는 적을 것으로 예상되며, 이를 기반으로 보수적 시나리오에 대해 재평가를 진행하면 C-14에 의한 피폭선량이 줄어들 것으로 예상된다. 또한 콘크리트의 낮은 투과율로 인한 느린 침출속도, 처분시설 환경에서의 $\text{Co}(\text{OH})_2$ 침전물 형성 및 Co, Sr, Cs의 콘크리트 및 흙에 대한 흡착도를 선량평가에 반영하여 피폭시나리오를 재평가할 경우, Co-60, Sr-90, Cs-137의 피폭선량이 감소할 가능성이 높다. 그러므로 실제 처분시설 내 주요 처분 핵종의 화학적 특성을 반영하면 경주 1, 2단계 방사성폐기물 처분시설 내 주요 처분 핵종의 처분농도 제한치를 상향시킬 수 있을 것으로 예상된다.

현재 중준위 방사성폐기물은 보수적인 처분농도 제한치로 인해 1단계 동굴처분시설에 인수되지 못하는 상황이며, 이는 처분시설의 처분 효율성 및 경제성을 저해하므로 반드시 해결해야 할 문제이다. 이를 해결하기 위해서는 본 논문에서 제시한 방안과 같이 주요 처분 대상 핵종의 처분농도제한치를 상향시키는 것이 필요하다. 또한 본 논문에서 제시하는 방향을 2단계 처분시설에도 적용하여 해외 처분시설과 유사한 수준으로 처분농도제한치를 올리는 경우 더 많은 방사성폐기물을 효율적이고 경제적으로 처분할 수 있을 것으로 기대된다.

경주 방사성폐기물 처분시설의 처분농도 제한치를 상향하여 효율적이고 경제적으로 처분시설을 운영하기 위해서는 핵종별로 화학적 특성을 반영해서 안전성 평가를 수행하는 연구가 필요하다. C-14의 경우, 강알칼리성 지하수 환경에서 대부분이 침전되고 중탄산이온으로 지하수에 녹아있을 것으로 예상되지만, 이를 실험적으로 보여줄 필요가 있으며 지하수 내 용해된 중탄산이온이 시추공을 통해 대기와 접촉하였을 때의 이산화탄소 기체 발생량 비율을 측정할 필요가 있다. Co, Sr, Cs에 대해서는 각 핵종 포함 고화체를 처분시설 환경(pH 및 이온조성)을 반영한 침출수 조건에서의 침출지수를 측정할 필요가 있다.

[참고문헌]

- [1] 중·저준위방사성폐기물 동굴처분시설 인수기준. 한국원자력안전공단.
- [2] 중·저준위방사성폐기물 2단계 표층처분시설 안전성분석보고서. 한국원자력환경공단.
- [3] 정세영. “양이원영 의원 ‘비싼 중준위 방폐장에 저준위 폐기물만 가득.’” 전기신문, October 11, 2022.
- [4] “Net Enabled Waste Management System (NEWMDB).” NEWMDB. IAEA. Accessed October 21, 2022. <http://newmdb.iaea.org/>.
- [5] Kekki, Tommi, and Antero Titta. “Evaluation of the Radioactive Waste Characterisation at the Olkiluoto Nuclear Power Plant.” STUK Radiation and Nuclear Safety Authority, 162, YTO, no. TR (March 2000).
- [6] US Nuclear Regulatory Commission. "Technical position on waste form." Low-Level Waste Management Branch, Washington, DC (1983).
- [7] Korea Radioactive Waste Agency (KORAD). Safety Analysis Report for Low- and Intermediate Level Radioactive Waste Disposal Facility. 정보공개청구, 5068919
- [8] 홍성욱, et al. "중저준위방사성폐기물 처분시설의 처분농도제한치 설정에 대한 고찰 II: 최적화 방법론 개발 및 적용." 방사성폐기물학회지 15.3 (2017): 265-279.
- [9] Park, Seung-Chul, et al. "A study on adsorption and desorption behaviors of ^{14}C from a mixed bed resin." Nuclear Engineering and Technology 46.6 (2014): 847-856.
- [10] Parkhurst, David L., and C. A. J. Appelo. "User's guide to PHREEQC (Version 2): A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations." Water-resources investigations report 99.4259 (1999): 312.
- [11] Rhee, In H. "Binary and Ternary Cation Exchanges: The Effect of Electrolyte Anions on Selectivity and Adsorption Capacity." Environmental Engineering Research 4.3 (1999): 195-206.
- [12] Li, Junfeng, and Jianlong Wang. "Advances in cement solidification technology for waste radioactive ion exchange resins: A review." Journal of hazardous materials 135.1-3 (2006): 443-448.

- [13] Dayal, R., and E. J. Reardon. "Carbon-14 behaviour in a cement-dominated environment: Implications for spent candu resin waste disposal." *Waste Management* 14.5 (1994): 457-466.
- [14] SKB. "The Biosphere model for radionuclide transport and dose assessment in SR-PSU. SKB-R-13-46." (2013).
- [15] SKB. "Safety Analysis for SFR Long-term Safety. Main Report for the Safety Assessment SR-PSU. SKB TR-14-01." (2014).
- [16] Measurement of the Leachability of Solidified Low-level Radioactive Wastes by a Short-term Test Procedure, ANSI/ANS-16.1-2003 (R2017). American National Standards Institute.
- [17] Garcia, E. M., et al. "Electrodeposition of cobalt from spent Li-ion battery cathodes by the electrochemistry quartz crystal microbalance technique." *Journal of Power Sources* 185.1 (2008): 549-553.
- [18] Cheon, Kyeong Ho, et al. "Adsorption characteristics of cobalt, strontium, and cesium on natural soil and kaolin." *Journal of Environmental Science International* 23.9 (2014): 1609-1618.
- [19] Shamsuzzaman, M., et al. "Radionuclide Adsorption Performance in Cement and Soil Medium for Safety Issue of Radioactive Waste Disposal Facility." *American Journal of Environmental Engineering* 8.1 (2018): 11-16.

제7회 방사성폐기물 관리 경진대회 아이디어 및 논문 우수사례집

방사성폐기물학회장상 - 아이디어-1

06

고준위방사성폐기물
처분장 부지선정의
사회적 수용성 제고를 위한
VR 적용방안

정 해 람 경희대학교



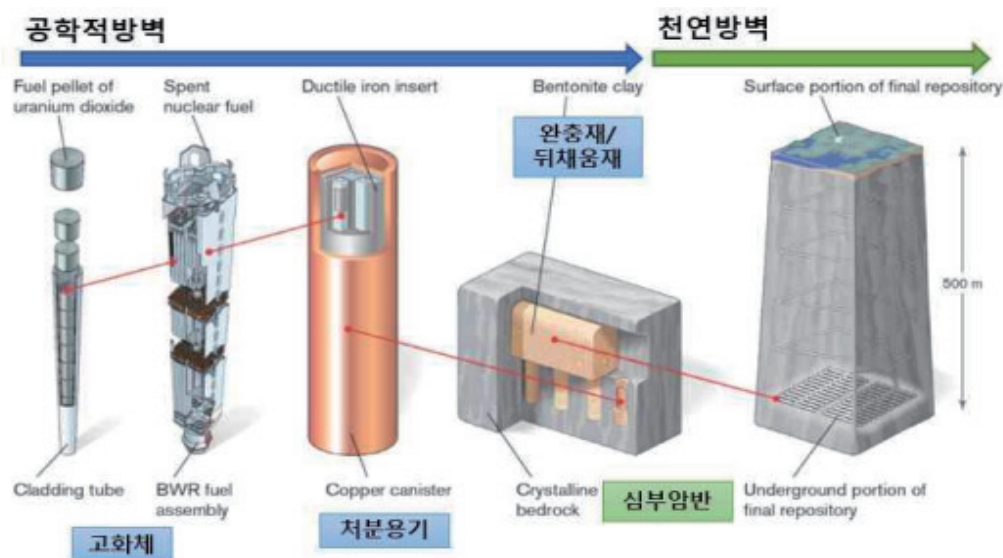
아이디어 선정배경

고준위방사성폐기물 처분장은 향후 지속적인 원자력 발전과 지속적 운영을 위해 필수적으로 논의되어야 하는 중요한 이슈 중 하나이다. 하지만 최첨단 과학적 이론과 실험에도 불구하고 처분장 부지확보 사업은 우리나라를 포함한 세계 각국에서도 쉽사리 진행되지 못하고 있다. 진행되지 못하고 있는 가장 큰 이유는 지역 주민들의 반대 때문이다. 실제로 국내 중저준위 방사성폐기물 처분장의 부지를 선정하는 데에는 지역 주민들의 반대로 사업 추진과 실패를 반복하며 대략 20년 정도의 시간이 소요되었다. 지역 주민들이 방폐물 관리시설을 꺼리는 이유는 다음과 같다. - 이해하기 어려운 복잡한 시스템과 현상들- 익숙하지 않은 개념에서 오는 공포- 인식하기 어려운 긴 시간대의 안전성 문제를 다룸- 내재된 불확실성에 대한 전문가들의 다른 의견들위에서 언급한 바와 같이 방사성폐기물 처리시설과 관련된 논란은 단순히 과학적인 현상을 규명하는 것뿐만 아니라 이해당사자들을 둘러싼 소통 방법이 적절하지 못하는 등 여러 가지 요인들이 복합적으로 작용되었다. 이러한 어려움을 극복하기 위해서는 대중들이 과학적·기술적 내용을 이해할 수 있게 하는 어떠한 방안이 필요하다고 생각하였고, 그 방안으로 방사성폐기물 분야에 대한 시각화 시스템(Virtual Reality)을 개발 및 제공하면 대중들에게 방사성폐기물 처분장의 안전 전략과 안전성에 대한 이해를 향상시키고, 효과적으로 과학집단의 정보가 전달될 수 있을 것이라는 기대와 함께 아이디어를 생각해내었다.

아이디어 개요

고준위방사성폐기물을 처분하기 위해 다양한 처분 방식이 연구되어 왔다. 그 중 심지층 처분 방식이 현재 기술로 가장 현실적이고 안전한 관리방법으로 고려되고 있으며, 그 안전 전략은 다음과 같다. 심지층 처분 방식은 다중방벽 시스템을 활용한 전략으로써 고준위방사성폐기물을 지하 깊은 곳에 격납하여, 인간과 환경으로부터 격리하고, 만일 핵종이 유출되더라도 자연적인 핵종 이동 지연 및 희석 과정을 통해 인간 생활 환경으로 나올 시점에는 자연방사능 수준이 되도록 하는 것이다.

<그림 1>



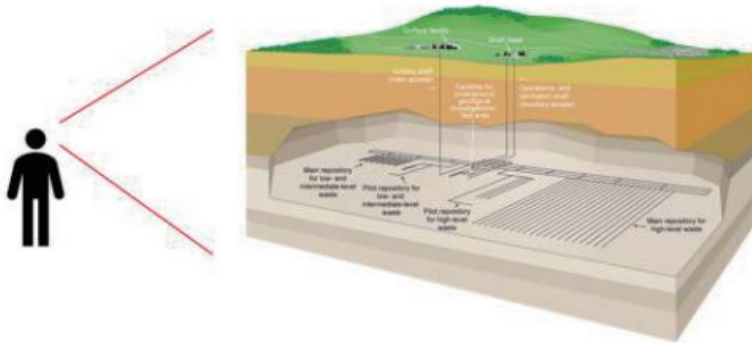
앞 단에서 전술한 바와 같이 방사성폐기물에 대한 안전전략과 안전성을 대중들에게 효과적으로 전달하기 위한 방안으로 시각화 시스템(VR) 개발을 생각해내었다.

VR이란, Virtual Reality의 약자로 가상의 공간을 구현하는 것을 넘어 사용자의 감각에 직접적으로 작용하여 실제에 근접한 공간적, 시간적인 체험을 가능케 하는 기술을 의미한다. VR은 최근 가장 주목받고 있는 기술 중 하나로써 교육과 의학 그리고 엔터테인먼트 등 다양한 산업 분야에 적용되고 있다. 본 제안에서는 이를 활용하여 대중들에게 고준위방사성폐기물 처분장의 안전 전략과 국가에서 진행된 안전성 평가 결과를 피교육자에게 시각적으로 확인할 수 있게끔 하여 향후 진행될 부지선정이 원활하게 이루어지는 것을 목표로 한다.

세부 추진방안

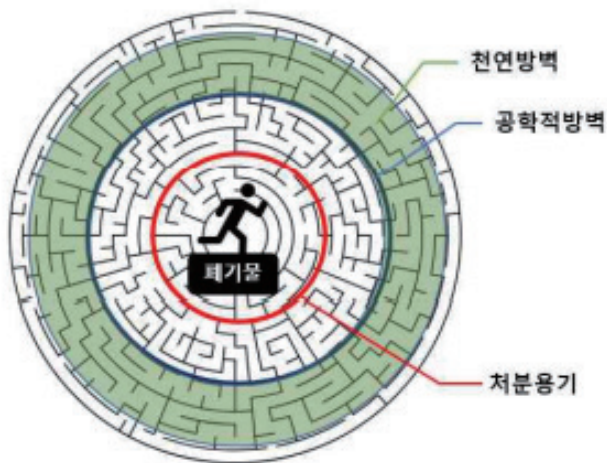
1) 설정1-1. 심지층 처분 방식의 다중방벽 시스템 안전 전략을 이해시키기 위해서는 우선, 처분장의 구성을 보여줄 필요가 있다.

<그림 2>



위와 같은 모의 공간을 만들어 사용후핵연료가 처분되는 공정과 사용후핵연료에서 발생하는 열과 방사선이 인간 생활권에 도달하지 못하도록 하기 위한 방법들을 소개한다.

<그림 3>



다음은 심지어 처분장의 안전성을 보여주기 위한 방법으로 사용자가 직접 고준위폐기물이 되는 것이다. 사용자는 인간 생활권까지 누출되기 위한 방사성핵종이 되어 지하수에 용해되고 암반의 공극 등을 통해 빠져 나가는 등의 시도를 한다. 하지만, 폐기물에서 발생하는 방사선과 그 위해는 지진과 처분용기 초기 파손과 같은 예상치 못한 사고들에도 십 만년이란 시간 동안 규제치에 도달하지 않는 것을 직접적으로 참여자로 하여금 체험하게 한다.

2) 활용처2-1. 지하연구시설(URL)지하연구시설이란, 방사성폐기물처분시설 개발 프로그램을 위한 기술을 개발하고 처분시스템의 성능 및 안전성에 대한 실증 연구가 이루어지고 있는 곳으로 심층처분 전문가 양성, 대국민 홍보 등도 그 목적을 함께하고 있다. 우리나라의 URL은 현재 대전에 위치한 KURT(Kaeri Underground Research Tunnel)가 유일하게 존재하는 지하연구시설이다. KURT에는 매년 1400명 이상의 시민들이 방문하고 있어 이곳에 위 언급한 체험장을 마련하면 대중들에게 방사성폐기물 처리시설에 대한 긍정적인 이미지를 조성할 수 있을 것이다. 2-2. 원자력환경공단 방사성폐기물 홍보관원자력환경공단의 청정누리공원에는 방폐물관리사업에 대한 올바른 정보를 얻을 수 있는 전시관과 대중들이 즐길 수 있는 체험장이 마련되어 있다. 실제로 원자력환경공단은 2021년 11월 메타버스 중·저준위방폐물 처분시설을 구축하여 가상 투어할 수 있는 공간을 마련한 바 있으며 여기에 더하여 아직 부지가 선정되지 않은 고준위방사성폐기물 처분장의 가상 공간을 마련한다면 보다 다양한 학습의 장을 조성할 수 있을 것이다.

기대효과

1) 원자력 분야에서 항상 첫 번째로 고려되는 것은 안전이라고 할 수 있다. 하지만 안전은 각 개인과 집단마다 인식하고 있는 바가 다르다. 최근 현대 사) SKB 2011. Environmental Impact Statement, Interim Storage, encapsulation and final disposal of spent nuclear fuel, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, Stocholm Sweden. 2) Nagra, 2014, Technical Report 14-10, Modelling of Radionuclide Transport Along the Underground Access Structures of Deep Geological Repositories회는 개인주의와 삶의 질에 대한 다양한 사고방식으로 인해 단순히 정량화된 수치를 만족하는 것만으로는 정당성을 인정받기 어렵다. 실제로 앞서 전술한 바와 같이 국내 중저준위 방사성폐기물 처분장의 부지를 선정하는 데에는 지역 주민들의 반대로 오랜 시간이 소요되었다. 일반 시민들의 참여를 바탕으로 한 사회적 소통의 중요성이 강조되고 있는 이러한 상황에서 본 제안은 기존의 생소하게 느껴졌을 방사성폐기물이라는 개념을 대중들에게 익숙하게 하고, 과학적인 이론과 관련한 이해 부족에서 발생하는 혼란을 감소시킬 수 있을 것이다. 처분 사업의 이해당사자들이 기관의 신뢰가 쌓이게 되면 기술적인 세부 사항들에 대한 한층 높은 신뢰가 형성되어 더 원활하게 사업의 진행도 기대할 수 있다.

2) 지난해 7월 정부는 디지털 대전환을 목표로 국가산업의 경쟁력을 높이기 위한 디지털 뉴딜 2.0을 발표하였다. 원자력계도 이에 발맞추어, 가상현실과 같은 디지털에 익숙하고, 즉각적인 반응에 예민한 MZ세대를 겨냥해 고준위방사성폐기물 처분장을 가상공간으로 구현하여 방사성폐기물이 어떻게 처분되는지 직접적으로 체험하게 함으로써 이에 대한 높은 이해도와 관심도를 끌어낼 수 있을 것이다.

1) SKB 2011. Environmental Impact Statement, Interim Storage, encapsulation and final disposal of spent nuclear fuel, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, Stocholm Sweden.

2) Nagra, 2014, Technical Report 14-10, Modelling of Radionuclide Transport Along the Underground Access Structures of Deep Geological Repositories.

제7회 방사성폐기물 관리 경진대회 아이디어 및 논문 우수사례집

방사성폐기물학회장상 - 아이디어-2

07

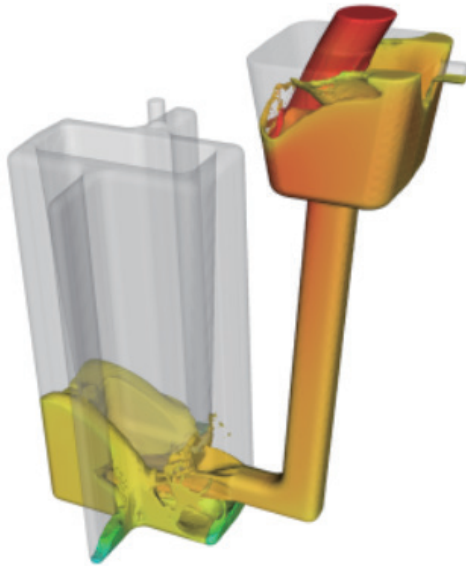
방폐장 내부
Gravity flow를 이용한
드럼 운반 시스템

김 태 현 성균관대학교

아이디어 선정배경

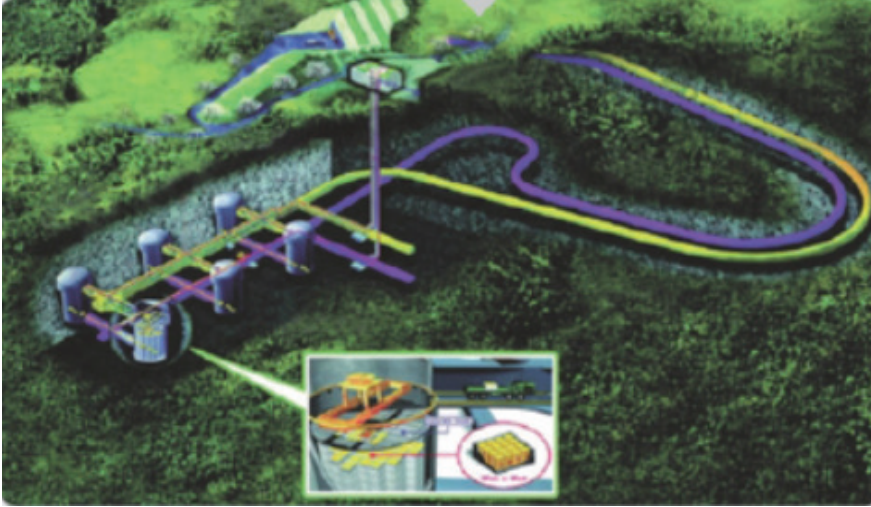
최근 에너지 효율화가 진행되면서 기계적 운반을 통한 제조 공정보다 효율적이고 안전한, 중력을 통한 제조 공정 과정이 떠오르고 있다. 본 아이디어의 핵심은 이러한 ‘Gravity flow’를 제조가 아닌 ‘운반과 처분’에 중점적으로 적용함에 있다. 철, 청동, 알루미늄 등을 사용한 공정 과정에서 아래 그림과 같은 중력 구조를 사용한다. 뿐만 아니라, 바이오 공정 과정에서도 공장의 윗층에서 시작한 바이오약품이 중력에 의해 한층한층 내려오며 공정과정을 거치는데, 이러한 원리는 해당분야에만 국한되지 않고 다양한 분야에 적용될 수 있다.

<그림 1> Gravity pour



Gravity flow는 단순히 중력을 이용하여 위쪽에 위치하던 물질을 아래쪽의 원하는 곳으로 이동시키는 것을 말한다. 따라서 이러한 중력의 흐름을 방폐장의 구조에 적용한다면 방폐물이 담긴 드럼 운반과 처분을 좀 더 안전하고 효율적으로 발전시킬 수 있을 것으로 예상된다. 현재 고준위 방폐물과 일부 중, 저준위 방사성 폐기물에 대하여 방폐장에서 방폐물을 처리할 때에는 200L, 320L 등의 드럼 용기에 밀폐하여 지하처분 시설로 이동한다. 이때 드럼을 처분 용기에 담아 트럭을 통해 이동하는데 여기서 발생하는 불편함과 번거로움이 존재한다. 트럭에서 운반된 드럼을 방폐장 입구에서부터 크레인이나 지게차를 통해 옮기며 즉, 운반용기에서 처분용기로 옮겨 담는다. 또한 이를 다시 지하의 저장소에 저장하기 위해 운송, 처분하는 과정을 거쳐야한다. 방금 언급한 과정에서 처분동굴을 들어가기 위한 다양한 절차도 진행되어야 한다. 따라서 이러한 과정은 매우 번거로울 수 있다. 또한 아래 그림과 같이 방사능의 노출을 제거하기 위해 지하 깊숙이 들어가는 지하처분시설인 만큼, 차량을 통한 이동과 한번 이동할 때 운송 가능한 양에 한계가 있다.

<그림 2> 방폐장 내부 경로

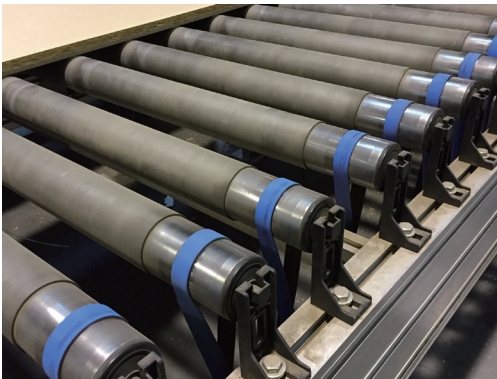


따라서 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안을 고안해 보았고, 그 결과 방폐장에서 드럼 용기를 ‘처음 처분하는 위치’가, 방폐장에서 가장 높은 위치인 ‘지상’임을 감안하여 해당 원리인 'Gravity flow'를 적용할 수 있다고 결론 내렸다. 다시 말해 지상에서 드럼 용기를 새로 고안한 설비에 투입하고, 중력을 이용해 지하 저장소로 옮겨주는 설비를 구축한다면 업무 처리 시간 뿐만 아니라 인력 사용 감소, 업무 간 안전성 확보 등의 장점이 발생할 것으로 보았다.

아이디어 개요

본 아이디어의 핵심은 방폐물이 담긴 드럼 용기를 중력 흐름에 따라 이동시킴에 있다. 기존의 지게차와 차량으로 드럼을 지하의 저장소 앞까지 운반하는 방식과 달리, 효율적인 방식을 제안하고자 한다. 방폐장 입구에서 드럼 용기를 넣으면 지하의 저장소 앞까지 용기가 배달되는 운반 트레이(tray)를 제작하는 것을 추천한다. 복잡하고 특별한 구조를 필요로 하지 않고, 컨베이어 벨트 혹은 롤러 드라이브벨트와 같은 단순한 장치를 통해서도 이러한 설비를 쉽게 구축할 수 있을 것이다. 아래 그림과 같이 롤러 드라이브벨트의 장점은 벨트 위에 놓인 물체가 작은 힘에도 마찰 없이 이동한다는 것이다.

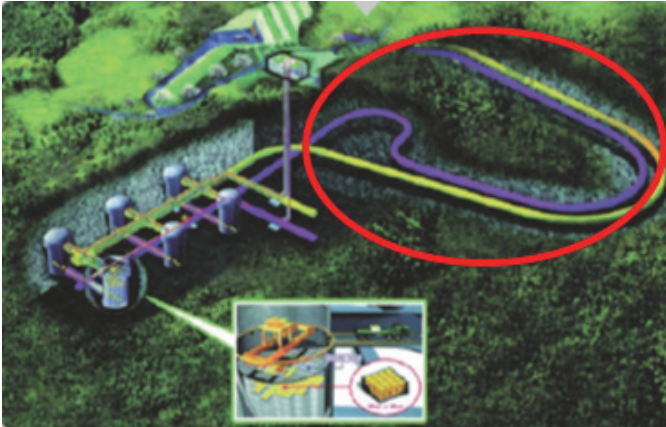
<그림 3> 롤러 드라이브 벨트



우리에게는 중력이라는 물리적 힘이 존재하기 때문에 방폐장의 경사 구조를 따라 롤러 드라이브벨트를 설치한다면 별도의 운송 차량과 인력 없이 드럼 운반이 가능해질 것이다. 다만 한 가지 더 고려할 점은 중력에 의한 가속도에 의해 드럼이 지나치게 빨라지지 않도록 속도를 조절해야 한다는 것이다. 이러한 문제는 과속 방지대를 통해 해결할 수 있는데, 롤러 드라이브 벨트에 의해 발생한 속도를 감소시킬 수 있는 과속방지대를 설비 중간중간에 설치한다면, 드럼 운반 시 안전을 위해 요구되는 적정 속도에 맞춰 속도를 조절할 수 있을 것이다.

먼저, 우선시 되는 목표는 아래 그림과 같이 방폐장 내부, 해당 구역에 드럼 운반 설비를 설치하는 것이다. 지상에 드럼이 운반되면 가장 높은 위치에너지를 가지고 있기 때문에 중력의 흐름에 따라 드럼을 저장소까지 이동시킬 수 있을 것이다.

<그림 4> 롤러 드라이브벨트 설치 구역



본 아이디어를 통해 Gravity flow를 이용한 드럼 운반이 가능해진다면 드럼 처분 시 발생하는 안전문제와 처리 시간을 감축하여 기존의 한계를 극복할 수 있을 것이다.

세부 추진방안

이번 연구에서 이뤄야할 목표는 크게 두 가지이다. 첫 번째는 ‘실제로 방폐장 내부에 롤러 드라이브벨트를 이용한 트레이를 설치할 수 있는지’이고, 두 번째는 해당 운반 트레이와 결합할 과속방지대의 모델을 창안하는 것이다.

첫 번째 사안에 대해서는 현재 시중에서 사용되는 공장 설비를 참고하여 쉽게 설치 계획을 수립할 수 있었고, 두 번째 사안에 대해서는 주변에서 이미 사용되는 방법을 모방에 새롭게 창안에 보았다. 어떤 방식을 도입한 지는 뒤에 내용에서 설명하도록 하겠다.

아래 그림은 우리가 운반해야할 드럼 용기이다. 높이 1.2 m, 지름 0.6 m의 크기를 가진다. 본 자료에서는 위의 크기를 기준으로 설명하지만, 드럼 용기의 크기가 다양한 만큼 실제 장비 도입을 기획할 때에는 ‘최대기준치법’을 적용하면 된다. 가장 큰 크기의 드럼 용기를 기준으로 설비를 건설한다면 이후 설비 사용 시 드럼 용기 크기에 따른 문제가 발생하지 않을 것이다.

<그림 5> 드럼 용기



먼저 첫 번째 목표를 이루기 위한 방안에 대해 살펴보겠다. 아래 그림과 같이 높이 1.2m, 지름 0.6m의 드럼 통을 운반하기 위해서는, 그 크기에 맞는 공간을 가진 통로가 필요하다.

<그림 6> 드럼 용기와 관 구조의 컨베이어 벨트



따라서 1.2m x 0.6m 넓이의 관을 제작하는 것은 필수적이며, 이런 구조는 현재 대부분의 공장에서 사용하고 있는 컨베이어 벨트 구조를 참고하여 손쉽게 기획할 수 있었다. 오늘날 택배 산업, 식품 산업, 약재 산업 등 대부분의 산업에서 컨베이어 벨트를 사용하고 있는 만큼, 여러 가지 분야를 조사하여 여러 컨베이어 시스템 중 드럼 용기 운반에 용이한 롤러 드라이브 벨트 구조를 채택하였다.

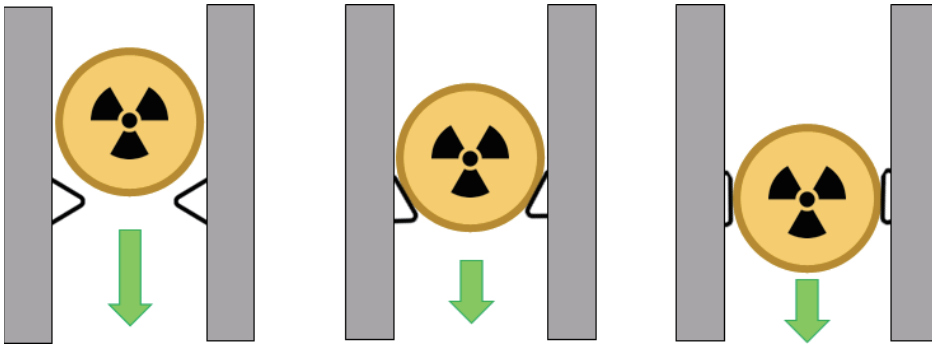
<그림 7> 식품 사업, 택배 사업에서 사용되는 컨베이어 벨트



한편 방사성 폐기물은 일반 상품과 달리 특이점이 하나 존재한다. 바로 방폐물을 담은 용기를 운송하는 것이기 때문에 해당 관이 방사능을 차단하는 특성을 가진 재료여야 한다. 이러한 부분에 대해서는 방사선 차단 납판 등을 이용하여 내부를 코팅한다면 드럼 운송 중 발생하는 방사선 노출 문제를 해결할 수 있을 것이다. 나선형의 단순한 구조를 가진 방폐장의 내부 기울기를 따라 컨베이어 벨트가 부착된 관을 설치한다면 복잡한 설계 없이도 드럼 운송 트레이를 충분히 제작할 수 있을 것이다. 관이 완성되면 아래 부분에 롤러 드라이브벨트를 설치하여 기울기 방향으로 드럼 용기가 움직일 수 있도록 만든다. 이렇게 되면 하늘에 놓인 공이 밑으로 낙하하듯이, 드럼 용기가 지상에서 지하 동굴로 미끄러지듯 떨어질 것이다.

다음으로 두 번째 사안에 대해 얘기해 보겠다. 우리는 아직 해결해야하는 문제가 하나 남아있는데, 이는 바로 점점 빨라지는 드럼 용기의 속도를 감소시키는 것이다. 만약 과속방지대를 설치하지 않고 드럼 용기를 지하로 보낸다면 지상에서 지하까지의 높이, 'h'에 따라 $\sqrt{2gh}$ 의 속도를 가지고 빠르게 이동할 것이다. 지상에서 저장소까지의 높이가 20m라고 가정한다면 드럼 용기가 지하로 배달되었을 때의 속도는 20m/s로 매우 빠른 속력을 가지게 된다. 따라서 드럼 용기가 운송되는 중간중간 과속방지대를 설치하여 이러한 문제를 해결해야한다. 현재 시중에서 커다란 드럼통을 대상으로 사용되는 과속방지대가 없는 관계로 새로운 과속방지대를 창안해보았다. 아래 그림은 삼각형 고무 받침대를 이용하여 감속을 유도하는 모델을 나타낸 것이다. 현재 의약품 공장에서도 제품이 담긴 유리병을 보호하기 위해 실제 사용 중인 모델이며, 이를 드럼통의 크기에 맞게 확장하여 모델링해보았다.

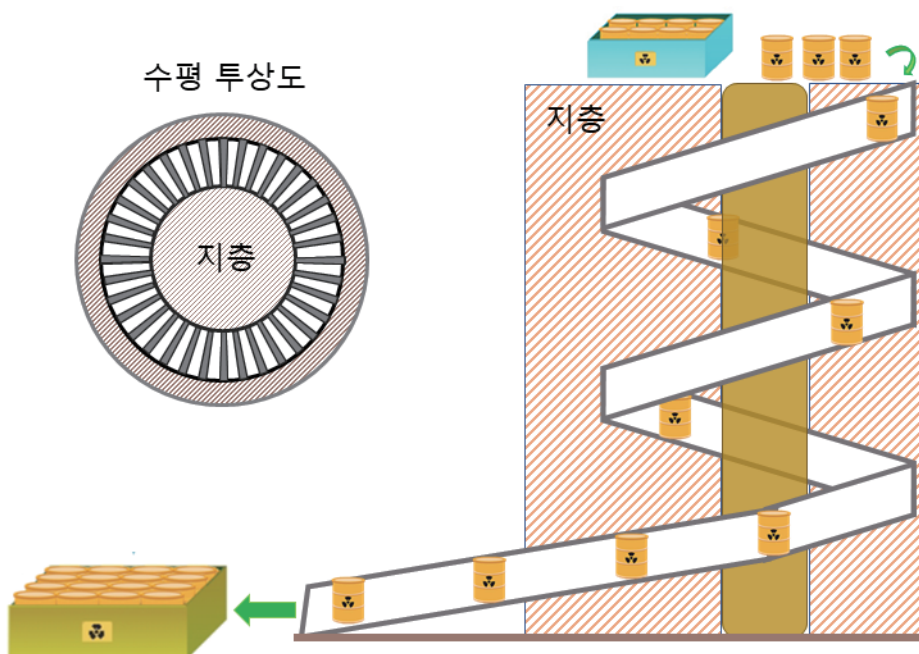
<그림 8> 컨베이어 벨트에 설치할 과속방지대 모델



고무 삼각대의 탄성력을 조절하거나, 설치 개수를 통제하여 방폐물이 담긴 드럼 용기의 속도를 컨트롤할 수 있다. 또한 위에서 창안한 모델은 과속방지대의 초기 모델이면 향후 설비 계획을 통해 발전시킬 수 있다.

결론적으로, 중력을 이용해 아래로 떨어트리는 단순한 원리를 이용하여 방폐장에서의 방폐물 처분을 빠르고 쉽게 진행할 수 있다. 해당 설비가 적용 가능한 이유는 방폐물 처리가 드럼 용기를 넣었다 뺐다하는 양방향 운반이 아닌, 한번 저장소에 처분하면 다시 꺼내지 단방향 운반이기 때문이다. 현재 많이 사용되는 장비를 통해 쉽게 제작이 가능하고, Gravity flow 원리를 이용한 드럼 운반이 효과적이기 때문에 해당 아이디어의 실행이 필요하다고 생각한다. 아래 그림은 본 아이디어의 대략적인 모식도를 나타낸 것이다.

<그림 9> 아이디어 최종 모식도

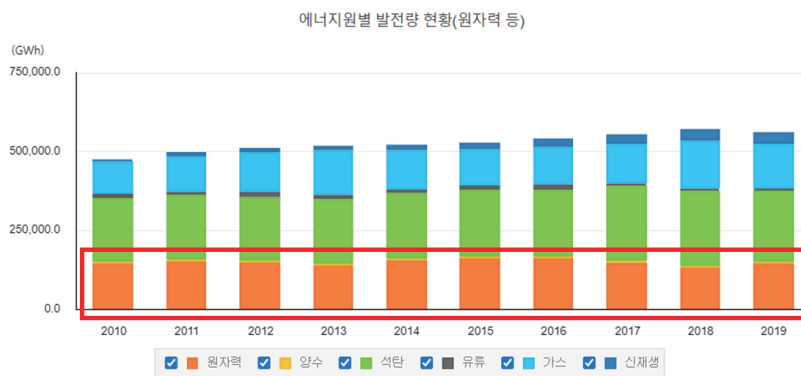


기대효과

방폐장 내부 Gravity flow를 이용한 드럼 운반 시스템을 도입하게 된다면 아래와 같은 기대 효과를 얻을 수 있다.

단순한 설계 구조이기 때문에 초기 설치비용이 저렴하다. 전력 생산에 있어 석탄, 석유와 같은 화석연료가 부족한 우리나라에서, 원자력 에너지는 포기할 수 없는 중요한 발전 요소가 되었다. 실제로 ‘한국전력공사 월별 전력통계속보, 연도별 한국전력통계’에 따르면 2010년부터만 보더라도, 한국의 전체 전기 생산량에서 원자력 발전이 차지하는 비중은 23.4%-31.2%에 달한다.

<그림 10> 한국전력공사 연도별 한국전력통계



따라서 앞으로 장기적인 관점에서 봤을 때 원자력 발전이 지속된다면, 방사성 원료에서 발생한 방사성 폐기물을 처리하는 문제 또한 무시해선 안 되는 중요한 사안이 될 것이다. 그렇기 때문에 위와 같은 구조처럼 단순한 모델을 활용해 드럼 운반 시설을 저렴한 비용으로 사전에 설치한다면, 앞으로의 방폐물 처리과정에서 절약하는 시간과 비용이 상당할 것으로 예상된다.

사람이 크레인이나 지게차를 통해 직접 운송을 하지 않기 때문에 인건비와 유류비가 절약된다. 앞에서도 언급한 것처럼 원자력발전소에서 방폐장으로 방사성 폐기물이 도착하면, 방폐물을 처분하기 위해 저장소까지 차량을 통해 사람이 직접 운송을 해야 한다. 이 과정에서, 차량에 사용되는 기름값과 운행하는 사람의 인건비가 발생하는데, 드럼 운반 시스템을 적용한다면 지게차 혹은 운반 차량으로 저장소까지 운반하는 과정을 생략할 수 있어 비용을 절감할 수 있다. 지상에 입구에서 드럼용기를 투입하면 차량을 사용할 필요가 없고, 사람이 운전할 필요 또한 없기 때문이다.

운송 도중 발생하는 안전사고를 예방할 수 있다. 고중량의 드럼 용기를 운반용기에서 내려서 인수검사를 하고 다시 운송한 후 처분용기에 담는 과정에서 안전사고가 발생할 가능성이 있다. 그 이유는 업무 과정이 복

잡해질수록 근로자의 집중도가 떨어지고, 고려해야할 안전요소가 많아지기 때문이다. 한가지 예시로, 지게차를 사용하는 경우, 지게차 적제량에 대한 문제 또는 운전자와 보행자 간의 시야 문제로 안전사고가 발생할 수 있다. 하지만 드럼 운반 시스템을 사용하면 드럼을 인하하고 이동시키며 인양하는 복잡한 과정들이 없어지기 때문에, 앞에 예시와 같은 인적 피해를 처음부터 제거할 수 있다.

방사성 폐기물을 처분하는 업무 속도를 향상시킬 수 있다. 고준위 방사성 폐기물 혹은 일부 중, 저준위 방사성 폐기물의 경우 동굴처분 혹은 심층처분이라고 하여 땅 속 방폐장의 저장소에 묻어서 처리한다. 이때 방사성 폐기물이 담긴 드럼 용기가 건설동굴, 운영동굴, 처분동굴 등을 거쳐서 이동하기 때문에, 특정 구역을 통과하기 위한 많은 절차와 과정이 있을 뿐만 아니라, 마지막 도착지인 저장소까지 드럼 용기가 이동하는데 상당한 시간이 소요된다. 하지만 Gravity flow를 활용한 드럼 용기 운반 시스템이 설치된다면, 드럼 용기의 중량, 표면 선량률을 측정하는 전수검사와 핵종분석, 표면오염도 등을 측정하는 표본검사를 마치면 곧바로 설비에 실어 저장소로 보낼 수 있다. 처분동굴까지 이동하는 절차와 과정을 생략할 수 있는 것이다. 이를 통해 방폐물 처분을 위한 업무 시간을 단축할 수 있다.

마지막으로, 미래에 기계화-자동화를 통한 발전가능성이 크다. 현재 방폐장에서는 장비의 유지, 보수를 제외하고도 사람이 직접 처리해야하는 다양한 업무가 존재한다. 예를 들면 저장을 위한 천장크레인을 조작하거나, 방사선을 잘 차단하였더라도, 이후 상황을 감시하고 저장소를 관리하는 등의 업무가 있다. 따라서 미래에 기술발전을 통해 방폐장을 자동화시킨다면, 이러한 업무를 사람이 하지 않고 기계가 대체할 수 있을 것이다. 지상에서 방폐물 드럼 용기만 투입하면 저장소까지 운반할 뿐만 아니라, 직접 저장 및 처분까지 기계가 전담하여 진행하는 것이다. 크레인을 프로그램으로 조작하여 방폐물을 자동으로 저장하고, 방사능과 방사선이 노출되는 정도를 센서를 통해 모니터링 한다면 기존보다 정확하고, 체계적인 관리가 가능할 것이다. 따라서 추가의 동력을 사용하지 않는 Gravity flow 운반 시설은 앞으로 펼쳐질 자동화, 최적화 시대에 걸맞은 첫 걸음이라고 생각한다.

Reference

['Gravity pour', 에스티아이씨앤디, <https://flow3d.co.kr/gravity-pour/>]

['방폐장 내부 경로', 한국원자력환경공단, https://www.korad.or.kr/korad/html.do?menu_idx=153]

['롤러 드라이브벨트', Ammeraal Beltech, <https://www.ammeraalbeltech.com/ko-KR/products/rapplon-high-performance-flat-belts/roller-drive-belts/>]

['식품 컨베이어 벨트', Industry Belt solution, <http://ko.tpu-belt.com/news/what-is-a-food-conveyor-belt-20006329.html>, 2018.12.]

['에너지원별 발전량 현황', e-나라지표, https://www.index.go.kr/potal/main/EachDtIPageDetail.do?idx_cd=1339, 2022.07]

제7회
방사성폐기물 관리 경진대회
아이디어 및 논문 우수사례집



한국원자력환경공단