

방사선을 막아주는 시멘트계 재료

이 승 현 (군산대학교 신소재·나노화학공학부 교수)

방사선은 병원의 방사선 진단·치료, 동위원소 실험·저장, 원자력발전소 등에서 널리 이용되고 보관되고 있다. 방사선 물질로부터 방출되는 방사선을 일정량 이상 쪼이게 되면 인체에 장해를 일으킨다. 방사선인 엑스선과 감마선은 콘크리트 중의 원자와 충돌하면 에너지를 잃어버린다. 따라서 이와 같은 시설에는 방사능 피폭으로부터 인체를 보호하기 위해 비중이 큰 중량 콘크리트로 방사선 발생원을 감싸서 방사선을 봉입시킨다. 원자력 발전소에서 발생하는 중성자는 밀도에 의한 효과 외에 콘크리트 중에 포함되어 있는 수분에 의해 차폐되기 때문에 결정수나 붕소를 포함하는 콘크리트가 사용된다. 엑스선이나 감마선 차폐용 콘크리트는 밀도나 화학성분이 균일하고, 균열에 의한 방사선의 누출이 일어나지 않도록 건조수축과 발열량이 적어야 한다. 또한 방사선 흡수에 의한 온도상승에 견뎌야 하며 방사선의 조사에 의해 유해한 물질이 발생하지 않아야 한다.

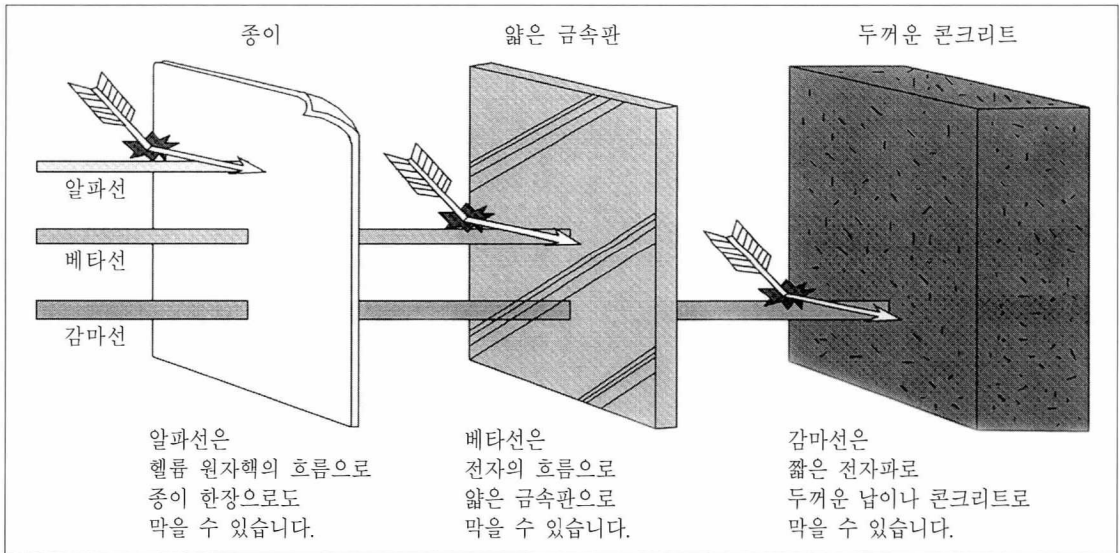
한편 원자력 발전소 등에서 배출되는 방사성 폐기물의 처분시설에 시멘트계 재료가 사용되고 있다. 방사선 핵종을 억제하기 위해서는 일반 구조물의 사용기간보다는 훨씬 긴 수천년 혹은 수만년의 장기적인 내구성이 요구된다. 우리나라에서도 중·저준위 방사성 폐기물 처리장이 경주에 유치되어 2009년부터 운영을 목표로 하고 있다.

방사성 폐기물 처리시설은 대형구조물이고 이러한 대형구조물의 건설에는 시멘트계 재료의 사용이 필수불가결하다. 콘크리트는 방사선을 방출하는 핵

종을 봉입하는 인공방벽으로서의 역할을 할 수 있는 최고의 재료이다. 본고에서는 방사선을 막아주고 방사선 폐기물을 처리하는 재료로서 시멘트계 재료의 성능과 요구되는 조건에 대해 설명하고자 한다.

1. 방사선의 종류와 성질

퀴리부인의 연구에 의해 방사선은 방사성 동위원소 속에 있는 원자핵으로부터 나온다는 사실이 밝혀졌다. 또한 그후 엑스선은 원자핵으로부터가 아니라 원자핵 주변의 전자로부터 나온다는 사실도 알려졌다. 캐나다 몬트리올 소재의 맥길대학 교수로 있던 영국의 물리학자 러더포드는 라듐을 넣은 작은 용기에다 사진 건판을 붙여놓고, 강한 자석을 가까이 두어 실험한 다음 그 사진을 현상하여 라듐에서 나오는 방사선이 세 방향으로 갈라지는 것을 발견하였다. 당시에는 이미 전기를 띤 입자의 운동은 자기장의 작용을 받는다는 사실이 알려져 있었고, 이에 대한 법칙도 밝혀져 있었다. 그래서 러더퍼드는 왼쪽으로 굽은 것은 플러스 전기를 띤 것이고, 오른쪽으로 굽은 것은 마이너스 전기를 띤 것이며, 똑바로 나오는 것은 전기를 띠지 않은 것이라고 판단하였다. 그리고 각각에 A, B, C에 상당하는 그리스문자 알파, 베타, 감마를 붙여 알파선, 베타선, 감마선이라고 이름을 붙였다. 베타선은 전자의 흐름이라고 알려져 있다. 또한, 그 속도가 아주 빨라서 1초에 지구를 일곱바퀴 반이나 도는 빛의 속도에 가깝다는 것까지



〈그림-1〉 방사선의 종류와 투과력

알려졌다. 베타선은 속도는 빠르지만 전기를 띠지 않기 때문에 물질속에서 정전기력을 받으므로 투과력은 그다지 강하지 않다. 베타선이라고 하면, 우리들의 일상생활과는 아주 먼 것처럼 생각되지만, 앞에서 이야기한대로 전자의 흐름이기 때문에 본질적으로는 전차를 움직인다거나 전등을 켜거나 라디오와 텔레비전에 사용하는 전류와 같은 것이다.

알파선에 대해서는 러더퍼드도 좀처럼 그 정체를 밝혀내기가 쉽지 않았는데, 영국의 맨체스터대학에 돌아가서부터 알파선을 모아 유리관에 채우고 불꽃을 방전시켜 스펙트럼을 조사한 결과 헬륨이라는 원소가 생성되어 있는 사실을 발견하였다. 이 사실을 토대로 알파선은 가벼운 가스인 헬륨 원소의 원자핵이라고 결론을 내릴 수 있었다. 알파선도 입자로 되어 있기 때문에, 그것을 알파입자라고 이야기하는 경우도 있다. 이 입자는 베타선보다 수천배나 무겁고 크기도 훨씬 작아 종이 한장으로도 막을 수 있다. 공기중에서도 몇 센티미터 정도밖에 날아가지 못한다.

감마선은 엑스선이나 빛과 같은 전자기파이나 엑스선보다 파장이 더 짧다. 감마선의 특징은 물질을

투과하는 능력이 보통 엑스선보다 훨씬 강하다는 점이다. 투과하기 매우 힘든 것으로 알려진 납도 상당히 두껍게 하지 않으면 감마선의 투과를 막지 못한다. 감마선은 알파선이나 베타선 또는 양성자선과 같이 입자선이지만 전기를 띠고 있지 않으므로 물질속을 비교적 멀리까지 지나갈 수 있으므로 〈그림-1〉과 같은 두꺼운 콘크리트 등으로 차폐물을 설치해야 한다.

2. 방사성 폐기물 처분에서 시멘트계 재료의 역할

산업자원부는 2007년부터 경주에 중·저준위 방사성폐기물처분장 건설을 시작할 예정이다. 1단계 건설은 지하 80m 깊이 바위속에 수직원통형 인공동굴을 만들어 폐기물을 처분하는 동굴방식이 채택되었으며, 2단계에서는 1단계 건설경험과 폐기물 특성·처분기술 변화 등을 고려해 동굴식과 천층식 2가지 방식에 대해 유연하게 결정할 계획이다. 천층식은 지하 10m 깊이에 콘크리트 구조물을 만들어 폐기물

을 매립한 후 콘크리트로 덮는 방식이다. 중·저준위 방사성폐기물 처분에 관한 기본적인 시스템은 천연 장벽(암반, 토양 등)과 인공장벽(구조물, 용기 등)을 조합한 다중장벽으로 구성된다. 이러한 장벽에 의해 방사성 핵종이 주위 환경에의 침투·확산되는 시간을 지연시켜, 그 사이에 방사능을 감소시키는 효과를 이용하여 방사능을 단계적으로 경감해 가고자 하는 것이다. 이러한 시설에는 장벽재료로서 시멘트계 재료와 벤토나이트계 재료가 이용되고 있다. 시멘트계 재료는 폐기물을 고화시키는 고형화제, 폐기물의 수납용기의 틈을 충전하는 충전재 및 구조체로 사용된다. 처분시스템에 있어서 시멘트계 재료의 역할은 물리적 장벽기능과 화학적 장벽기능으로 대별된다. 물리적 장벽기능으로는 시멘트의 수화반응이 진행됨에 따라 강도의 발현과 치밀한 조직의 생성에 의해 폐기물이 이동하지 못하므로 공간적인 격리를 확보할 수 있다는 것이다. 화학적 장벽기능은 시멘트 수화물의 용해에 따른 기공수의 높은 pH로 인해 방사성 핵종의 용해도 저하와 수화물에 대한 방사성 핵종의 흡착 등을 들 수 있다.

방사성 폐기물 처분시설은 폐기물에 함유되어 있는 방사성 핵종의 농도를 기준으로 중·저준위와 고준위로 구분한다. 앞서 언급한 것과 같이 처분방법의 기본적인 생각은 시간의 경과함에 따라 폐기물 중의 방사능이 감쇄하여 인간 및 생물 환경에의 영향이 없을 때까지 인공장벽에 가두어 핵종의 이동을 방지하는 것이다. 방사성 폐기물을 처리하는 시설에서 사용되는 시멘트계 재료는 ① 역학성능(내하력), ② 물리적으로 핵종을 가두는 성질(지수성능), ③ 화학적으로 핵종을 가두는 성질(흡착성능), ④ 장기간의 화학적 안정성, ⑤ Ca 용해에 의한 천연장벽에의 영향 저감 등이 요구된다.

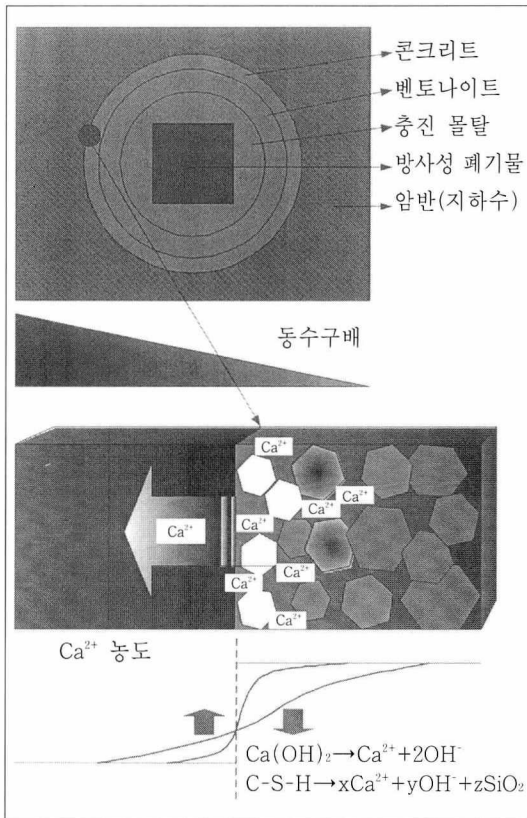
방사성 폐기물 처분장이 건설되는 지하 환경은 황산염침식, 철근부식, 알카리골재반응, 수산화칼슘 용출 등의 열화 요인이 존재하나, 안정한 환경의 선정, 시멘트계 고내구성 재료의 사용으로 어느 정도 열화 요인을 피할 수 있다. 한편 시멘트계 재료에서 수화

물의 용탈은 피할 수 없는 현상이기 때문에 이에 대한 정확한 예측과 ①~⑤에 미치는 영향을 파악하는 것은 매우 중요하다. <그림-2>에 방사성 폐기물 처분시설의 개요와 시멘트 수화물의 용탈을 그림으로 묘사하였다. 콘크리트의 세공용액에 용출된 칼슘 등의 성분은 지하수의 흐름이나 농도차에 의한 확산에 의해 이동된다. 이러한 현상에 의해 용해는 더욱 더 진행되어 인공 장벽의 지수성능과 역학성능이 저하된다. 따라서 시멘트계 재료는 이에 대한 평가와 대책을 마련하고 있다.

3. 시멘트계 재료의 방사성 물질에 대한 장기내구성 평가

방사성 폐기물 처분시설의 시멘트계 재료의 변질요인을 고려할 때 가장 중요한 항목은 지하수와의 반응이고, 그 다음이 용출과 2차광물의 생성이다. 용출은 시멘트 수화물로부터 경화체 세공용액에 성분이 용해하는 현상이다. 일반적으로 용출속도는 물질 이동속도와 비교하여 매우 빠르다. 용출에 의한 콘크리트의 변질을 평가·예측하는 수법으로는 촉진시험에 의한 방법이 검토되고 있지만, 검토 기간이 경험할 수 없을 정도의 장기간이기 때문에 최종적으로는 해석에 의존할 수밖에 없다.

해석적인 예측수법으로는 ① 실험식에 의한 방법, ② 확산방정식에 의한 방법, ③ 지구화학물질 이행해석에 의한 방법 등으로 나눌 수 있다. 용출에 의한 기존구조물의 노화는 수도시설, 댐, 수로, 수조 등 연수가 작용하는 구조물에서 나타나고 있다. 100년 정도 경과한 콘크리트 구조물의 조사결과(수산화칼슘이 감소하고 있는 깊이 조사)를 보면, 100년간에서도 변질 깊이가 수십밀리미터 정도로 변질속도가 매우 낮은 것으로 나타나, 일반 구조물에서는 전혀 문제가 되지 않는 것으로 평가되었다. 이러한 조사를 바탕으로 하여 천년 또는 만년을 선형회귀와 루트회귀로 예측한 결과, 두 방법에 의한 차이는 천년에서



〈그림-2〉 방사선 폐기물 처분장의 개요와 용탈 과정

3배, 만년에서 10배 정도의 차이가 났다. 따라서 보다 신뢰성 있는 해석수법이 필요하게 되어 ②의 확산방정식과 ③의 지구화학물질 이행해석을 이용하는 방법이 나오게 되었다. 양자의 큰 차이는 반응모델에 있고 ②의 수법은 현재 토목, 건축분야에서 중성화나 염해 등의 검토에 이용되고 있다. 그러나 시멘트계 재료는 물질의 이동속도에 영향을 주는 확산계수, 투수계수, 전기영동속도의 정량화에 관한 연구는 시작 단계이기 때문에 만족할만한 모델은 아직 구축되어 있지 않다.

콘크리트로부터 수화물의 용탈현상이 생기는 것은 오래전부터 알려져 왔고, 테일러는 포졸란 재료의 사용, 알루미나 시멘트 사용, 탄산화 콘크리트, 오토클레이브 양생 등 몇가지 대책을 내놓았다. 최근

중국에서 발견된 5천년전의 고대 콘크리트는 강재를 사용하지 않고 구조체로서의 역할을 수행하였으며, 성분조사 결과 현재의 저열 포틀랜드시멘트와 비슷한 것으로 나타났다. 실험결과, 저열 포틀랜드시멘트는 다른 시멘트에 비해 변질 깊이가 작게 나타났으며, 플라이 애시 등을 첨가함으로써 포졸란 반응에 의해 수산화칼슘의 소비가 촉진되고, 기공 굴곡에 의해 확산거리가 증가되어 용탈현상은 더욱 작았다. 용해도가 작은 수화물을 형성하는 포졸란 재료를 혼합한 시멘트는 다른 시멘트와 비교하여 천년 경과시 변질 깊이는 1/5 정도이었고, 탄산화시킨 저열 포틀랜드시멘트는 천년에서 칼슘 용출량은 1/4 정도였다. 이것은 수산화칼슘이 용해도가 낮은 탄산칼슘으로 전환되어 이러한 결과가 나타난 것으로 해석하고 있다. 이러한 예측결과를 바탕으로 시멘트계 재료의 용탈을 감소시키는 방법은 적절한 포졸란 재료의 사용, 탄산화 양생, 낮은 물분체비로 하는 방법이 제안되었다. 이러한 것을 응용한 하나의 예로서, 시멘트는 저열 포틀랜드시멘트를 사용하고 γ -C₂S, 플라이애시, 실리카흄을 혼합하여 수화 초기단계에서 탄산화 양생을 시키면, 기공율이 대폭 감소되고 칼슘 용출량이 저감되어 벤토나이트나 암반의 변질을 억제할 수 있다. 특히 γ -C₂S(시멘트 중의 C₂S는 β , α -C₂S)는 수화반응을 나타내지 않고, 탄산가스와 반응하기 때문에 기존에는 시멘트계 재료로 이용하지 않았지만 저용해도, 치밀화의 관점에서 보면 앞으로 활용이 기대되는 재료이다.

이러한 용탈제어기술을 이용하는 것에 의해 앞서 논한 5가지 성능 중에서 ① 내하력, ② 지수성능, ④ 화학안정성, ⑤ 용해에 의한 영향저감을 달성할 수 있다. 또한 이러한 시멘트계 재료는 장기적인 화학안정성의 확보나 기공율의 대폭적인 감소로 물질 이동 억제능력의 향상을 도모할 수 있어 일반 구조물의 중성화 억제나 염분침투에 대한 저항성을 대폭 개선시키는데 사용할 수 있다. 그러므로 이러한 기술은 방사성 폐기물 처분 뿐만 아니라 폭넓은 토목·건축 구조물에 적용이 가능하다.

4. 맺는 말

중·저준위 방사성 폐기물 처분시설이 경주시 양북면 봉길리에 확정됨에 따라 현재 건설사업이 진행 중에 있으며 2009년 완공을 목표로 하고 있다. 앞으로 우리나라도 고준위 방사성 폐기물의 처분해야 할 시기가 가까운 장래에 도래할 수 있다.

방사성 폐기물 처분에 있어서 시멘트계 재료의 사용은 필수불가결이다. 다른 재료로서는 기능적, 경제적인 면에서도 대체가 불가능하다. 시멘트계 재료가

고대 유적에 사용되어 5천년 이상 지났음에도 불구하고 내구성이 현재까지 유지되고 있다는 것을 볼 때, 시멘트계 재료의 우수성을 역사가 증명해 주는 좋은 예이다.

현재 우리는 원자력발전에 의한 에너지 혜택을 받고 있는 가운데, 혜택에 의해 폐기되는 방사성 폐기물을 시멘트가 인간과 환경에게 해가 없도록 안전하게 고화시켜 주고 있다. 방사성 폐기물 고화재료에 의 시멘트 사용은 시멘트가 인류의 안전과 평화 활동에 기여하는 좋은 예이다. ▲

시사 용어 해설

▶ 구분계리/내부유보액

생보사 상장과 관련된 또다른 이슈는 구분계리와 내부유보액 처리다. 이 모두 계약자 몫을 어떻게 볼 것인가를 두고 논의되는 회계처리 방식이다. 구분계리란 유배당과 무배당으로 판매한 상품에 대해 별도의 독립된 회계처리를 하는 방식이다. 즉, 유배당상품은 유배당계좌를 통해 손익을 처리하고 무배당도 동일한 방식으로 회계처리를 하자는 것이다. 이에 따라 보험사는 계약자배당을 실시하기 이전 이익발생에 대한 기여도, 보험사의 재무건전성 등을 감안해 유배당보험 계약으로 부터 발생한 당기순익을 계약자 지분과 주주 지분으로 나눠 지급하게 된다. 현재 유배당 상품 계약자를 자문위원회는 채권자, 생보사는 계약 당사자, 시민단체의 경우 주주의 성격을 갖는다고 봐, 현격히 다른 시각차를 드러내고 있다. 최근 무배당상품 중심의 상품구조를 고려할 때 구분계리 문제는 보험사의 장기투자자산 투자부문에서도 발생한다. 상장차익 배분에 대한 문제는 자문위원회 의견대로 계약자의 몫은 없는 것으로 정리됐다. 법적인 근거가 명확하기 때문이다. 자문위는 국내 생보사의 유배당보험 판매는 생보사의 설립형태와 직접 관계가 없으며 유배당보험 이익으로 과거 결손을 보전하는 것은 유배당보험 운영에서 발생하는 일반적 현상임을 근거로 제시했다. 또 보험 계약자가 과거 생보사들이 위기를 맞았을 때 보험금 삭감이나 보험료 증액 등의 위험을 부담하지 않았고 계약자 보호제도가 있었기 때문에 주주로 대우할 수 없다는 논리를 펼쳤다. 내부유보액이란 보험사가 보유하고 있는 자산을 평가해 나온 가치를 회사 자본금 계정에 적립하는 것을 말한다. 내부유보액은 생보사 상장의 가장 큰 걸림돌로 작용하고 있다. 지난 1989년과 1990년 교보생명과 삼성생명이 상장을 전제로 보유 자산을 재평가했다. 재평가 이익은 각각 878억원과 662억원. 두 생보사는 이중 30%는 주주, 40%는 계약자에게 배분하고 나머지 30%는 '내부유보액'으로 적립했다. 이 돈을 자본금으로 보게 되면 계약자 몫이라고 할 수 있는 자금이 회사가 수익을 내는데 기여한 것으로 간주돼 계약자들이 상장차익에 대한 몫을 주장할 수 있는 근거가 된다. 그러나 자문위원회는 이를 계약자에게 앞으로 배당해야 하는 일종의 '부채'로 간주, 자본금이 아니라는 결론을 내렸고 자본계정에서 부채계정으로 이전하는 방안을 검토하고 있다.