

중저준위 방사성 폐기물 포장용기의 파손모델 비교연구

박주완, 박진백, 김현주, 김창락

한국수력원자력(주)원자력환경기술원, 대전광역시 유성우체국 사서함 149호

중저준위 방사성 폐기물의 포장용기는 일정 기간동안 폐기물이 지하수와 접촉하는 것을 방지하는 기능을 가지나 시간이 지남에 따라 용기의 열화에 의해 방사성핵종의 누출이 일어나게 된다. 중저준위 방사성 폐기물 처분시설의 선원항 평가는 이러한 폐기물 포장용기가 언제 그리고 어떤 메커니즘에 의해 파손되는지, 폐기물 용기 전체가 동시에 파손되지 않는다면 어떻게 파손이 일어나는지, 그리고 폐기물 용기가 부분적으로 파손된다면, 파손이 전체적으로 일어나는 경우와는 달리 어떻게 방사성핵종이 누출되는지를 규명하기 위한 폐기물 용기파손 모델링이 필요하다. 일반적으로 보수적인 평가에 있어서는 포장용기의 내구수명을 가정하고 수명이 다하게 되면 포장용기가 동시에 파손된다고 보는 순간파손(single-time-to-failure) 모델을 사용하고 있으며 이는 파손율 분포함수의 분산 폭이 매우 좁은 경우에만 적용된다. 한편, 포장용기 파손 시간에 대한 분포가 처분 시설 내에서 방사성핵종의 평균 잔류시간보다 긴 경우에는 평가 결과에 영향을 미칠 수 있으므로 시간에 따른 용기파손을 모사하는 시간종속적 파손(distributed failure) 모델의 적용이 필요하다.

본 논문에서는 시간에 따른 포장용기 파손을 모사하는 용기열화 모델을 포함하는 DUST-MSD 프로그램을 사용하여 포장용기 파손시간 분포의 영향을 검토하였다. 처분시설에 균질의 포장용기를 정치하는 경우에 대해 순간파손모델과 시간종속적 파손모델(균일분포 파손모델 및 정규분포 파손모델)의 3가지 용기파손 모델을 적용하였고, 반감기가 짧은(반감기 44.7년) 핵종 A와 이의 붕괴로 생성되는 반감기가 긴(반감기 77,000년) 핵종 B를 고려하여 각각에 대한 파손모델별 핵종누출량과 농도를 계산하고 비교하였다. 모델링에 사용된 포장용기는 반경 25 cm, 체적 70,000 cm³의 원통형이며, 폐기물 고화체에서의 유효확산계수는 용기 파손시간대 보다 훨씬 긴 수백년 이상 누출이 일어나도록 하기 위해 두 핵종 모두 10⁻⁸ cm²/s로 가정하였다. 용기 파손시간은 순간파손 모델에서는 모든 용기가 정치된 후 100년에 순간적으로 파손되며, 균일분포 파손모델에서는 50년에 파손되기 시작하여 적체 후 150년에 종결되는 것으로, 그리고 정규분포 파손모델에서는 평균 수명이 100년이고 표준편차가 25년인 Gaussian 분포 파손율을 보이는 것으로 가정하였다. 처분이 시작되고 난 후 15년 후에 대상 포장용기가 정치되기 시작하였다고 가정하였으며 따라서 순간 파손시간은 처분시설 운영 후 115년이 지난 시점이다. 폐기물고화체는 초기에 핵종 A를 1 g 포함하고 있으며, 핵종 B는 핵종 A의 방사성 붕괴로부터 생성된다.

그림 1에는 시간과 용기 파손율에 대한 함수로써 핵종 A와 B의 총 누적 누출량을 나타내었다. 핵종 A의 경우, 순간파손모델에서는 시설 운영시점 이후 115년에 누출되기 시작하며 가장 낮은 총 누출량을 나타내는데 이는 누출 시점이 늦은 것과 방사성붕괴의 영향 때문이다. 총 누출량은 초기 재고량 1 g 중 약 0.075 g 정도이다. 정규분포 파손모델의 경우 분포함수의 끝부분 때문에 세 가지 모델 중 가장 먼저 누출이 일어난다. 균일분포 파손모델의 경우 대략 0.082 g의 핵종 A가 누출된다. 누출되기 전에 붕괴된 핵종 A는 모두 핵종 B로 전환된다. 핵종 B의 누출은 그림 1에 제시되어 있다. 총 누출량은 세 가지 파손모델에서 약 0.8 g 정도임을 보여준다. 모사 종료시점에서의 세 가지 파손모델에서의 누적 누출량 차이는 1% 이내이며 따라서 총 누출량의 경우 용기 파손율에 민감하지 않음을 알 수 있다.

그림 2는 폐기물 고화체와 접촉하고 있는 용액 내의 시간에 따른 핵종농도를 보여준다. 고화체로부터 핵종이 초기에 누출되면서 농도는 증가하고, 방사성 붕괴와 고화체로부터 이류에 의한 방사성핵종의 이동으로 인해 시간에 따라 감소하게 된다. 두 경우 모두 순간파손모델이 가장 높은 농도를 나타내는데, 이는 모든 용기가 단일 시간에 파손되기 때문이다. 핵종 A의 경우, 최대 농도

는 순간파손이 발생할 때 약 1.3×10^{-9} g/cm³이다. 정규분포 파손과 균일분포 파손의 경우 최대 농도는 7×10^{-10} g/cm³ 이하이며 이는 순간 파손모델의 경우에 비해 거의 1/2 정도 낮은 값이다. 핵종 B의 경우도 유사한 결과를 보여주고 있다. 순간파손모델의 경우 최대 농도는 8×10^{-9} g/cm³이며, 정규분포 파손과 균일분포 파손의 경우 최대 농도는 5×10^{-9} g/cm³ 이하이다. 균일 파손율의 경우 핵종 A에 대한 최대 농도는 대략 100년에서 120년 사이에 일어난다. 방사성 붕괴로 인하여 이 시점 이후에는 165년까지 추가적인 용기파손이 일어나더라도 농도는 낮아지게 된다. 핵종 B의 경우는 균일분포 파손모델에서의 농도는 모든 용기가 파손되는 165년까지 증가하며, 이 시점 이후는 고화체로부터 핵종 이동으로 인해 농도가 감소한다. 정규분포 파손의 경우 농도는 용기 파손율을 반영하는 분포를 보이고 있다.

파손모델에 따른 농도의 차이는 방사성붕괴, 용기 파손율, 고화체 누출율, 고화체로부터의 핵종 이동 관련 파라미터 등 다양한 파라미터의 영향에 의한 것이다. 그러나 본 해석사례에서 제시된 바와 같이, 중·저준위폐기물 처분시설에 대한 성능목표가 핵종의 누적 누출량을 기준으로 하는 경우는 파손분포 모델을 사용하는 것은 큰 의미가 없다고 할 수 있으나, 농도 혹은 농도에 선형적으로 비례하는 피폭선량을 기준으로 하는 경우에는 시간종속적 파손모델을 적용하는 것이 의미를 가지므로 선원항 평가 시에 필요한 용기 파손분포 데이터의 수집 등 이에 대한 대비가 필요한 것으로 판단된다.

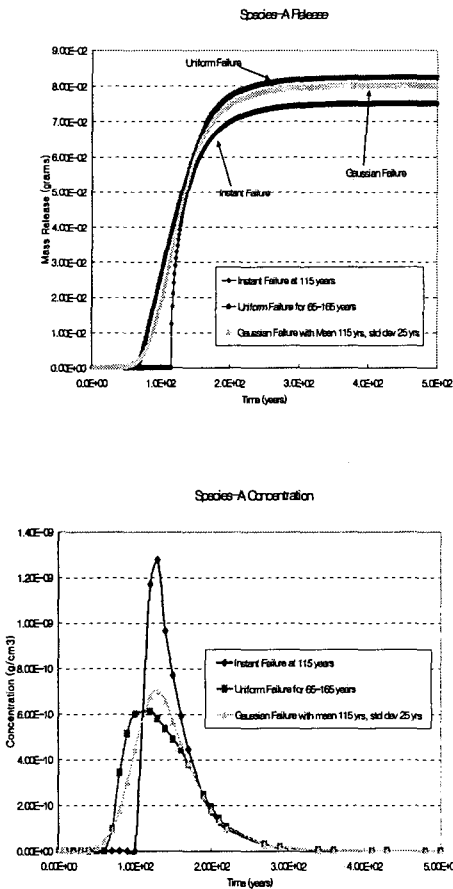


그림 1. 3가지 용기파손 모델에 대한 핵종 A와 B의 누적 누출량

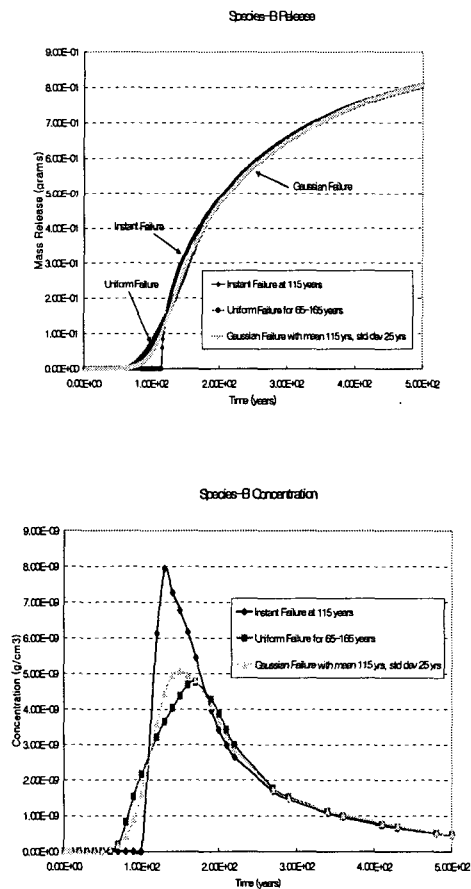


그림 2. 3가지 용기파손 모델에 대한 핵종 A와 B의 시간에 따른 농도