

ABAQUS를 활용한 심지층 처분환경에서의 구리 부식모델 개발

Study on Development of Cu Corrosion Model in Deep Geological Repository Condition using ABAQUS

김인영† · 최희주* · 이민수*

In-Young Kim, Heui-Joo Choi and Min-Soo Lee

1. 서 론

방사성폐기물 처분장은 방사성물질들을 격리하고 그 확산을 지연시킴으로써 인간과 생태계에 방사성 영향을 최소화하는 것을 목표로 한다. 이를 위해 일반적으로 처분용기, 완충재 등으로 구성된 공학적방벽과 환원환경의 심부지질조건을 갖는 천연방벽으로 다중방벽시스템을 갖는 처분시스템을 구성한다. 처분용기가 건전한 기간 동안 방사성물질은 완벽하게 격리되므로, 처분용기의 수명을 최대화하는 것은 처분시스템의 안전성 관점에서 매우 중요하다. 또한 안전성평가의 불확실성 제고를 위해서는 처분용기의 수명을 정확하게 예측하는 것이 매우 중요하다. 처분용기 실패의 가장 중요한 기작 중 하나는 부식으로, 본 연구에서는 ABAQUS 코드를 활용하여 심지층 처분환경에서 처분용기 재료물질인 구리 부식모델을 개발하고 이를 이용해 처분용기의 수명을 예측하고자 하였다.

2. ABAQUS 부식모델 개발

2.1 ABAQUS 적용성 평가

매우 낮은 수리전도도를 갖는 벤토나이트를 완충재로 사용하는 경우 이류 물질이동이 제한되므로 부식제의 이동은 확산에 의해 이뤄지며, 이 경우 1차원 부식제 이동 지배방정식은 다음과 같다⁽¹⁾.

$$J = -D_s \left(\frac{dC}{dx} \right), \quad \frac{\partial C}{\partial t} = D_a \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

† 교신저자: 한국원자력연구원

E-mail: iykim@kaeri.re.kr

Tel : 042)868-2505, Fax : 042)868-8198

* 한국원자력연구원

ABAQUS와 해석해, 수치모델의 비교를 위해 그림 1과 같은 조건을 갖는 시스템을 가정하였으며, 구리 표면으로 이동한 모든 부식제는 즉시 구리와 반응하여 구리 두께를 감소시키는 것을 가정하였다. 그림 2는 ABAQUS 해석 결과 및 수치해, 해석해⁽¹⁾를 함께 비교한 결과로 상부는 완충재 내에서 부식제의 농도 분포를 나타내고 있으며, 하부는 구리 표면에서 부식제 농도의 누적량을 나타내고 있다. 그림에서 확인할 수 있듯이 해석해, 수치해가 ABAQUS 해석결과와 잘 일치하고 있는 것을 확인할 수 있으며, ABAQUS 프로그램을 이용해 처분시스템의 구리부식을 평가하는 것이 가능할 것으로 판단된다.

2.2 실험실 장기부식 실험 해석

처분용기의 수명예측을 위해 약 700일간 한국원자력연구원에서 수행되었던 장기 실험실 부식 시험⁽¹⁾을 ABAQUS로 모델링하였다. 일반적으로 심지층 처분환경에서 O₂, Cl⁻, HS⁻가 구리의 부식제가 되는

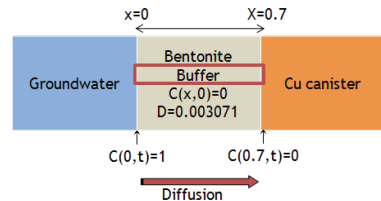


Figure 1 Problem conditions for verification

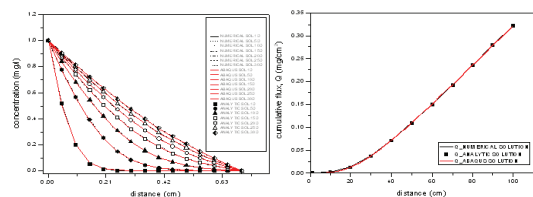


Figure 2 Verification results

것으로 알려져 있지만, 실험에서 사용된 지하수의 조건에서 Cl⁻의 영향은 무시할 수 있으므로 O₂와 HS⁻가 주요 부식제인 것으로 가정하였다. 실험 및 모델링 조건은 그림 3과 같다.

그림 4는 실험결과 및 모델링 결과를 나타내고 있다. 그림에서 확인할 수 있듯이, 실험조건에서 구리 부식은 용존산소보다는 황화이온에 의해 진행되며, 약 1년 정도 후에는 구리 부식두께의 증가가 완연히 감소하여 부식두께의 변화가 매우 작아지는 것을 확인할 수 있다. 구리 부식두께 모델링 결과가 실험 측정값보다 매우 큰 것은 실제 실험에서는 실

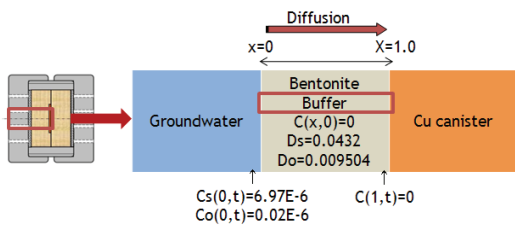


Figure 3 Corrosion experimental condition

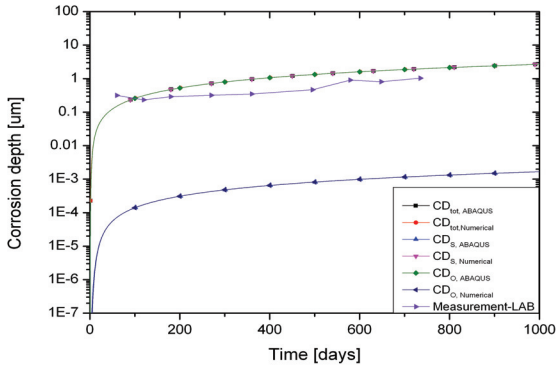


Figure 4 Corrosion experiment & modeling results

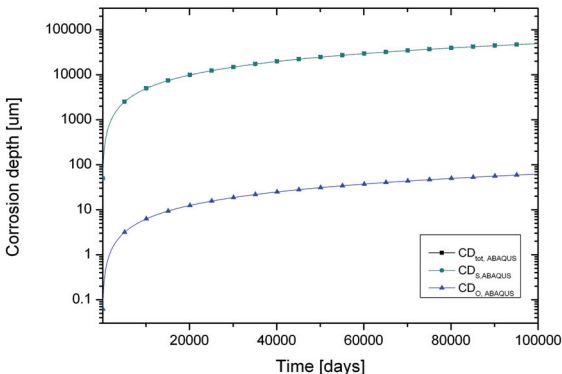


Figure 5 Canister lifetime expectation

험셀을 용기 내에 밀봉하였기 때문에 실험이 진행될 수록 부식제의 농도가 감소하는 반면 모델링에서는 부식제의 농도가 감소하지 않고 일정하게 유지된다고 가정하였기 때문이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 모델링을 통해서 얻은 구리 부식두께가 실험값보다 매우 보수적으로 평가되었으며, 이를 이용해 처분용기의 수명을 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

그림 5는 ABAQUS를 이용한 10 mm 구리용기의 10만 년간 부식두께를 예측한 결과를 나타내고 있다. 처분용기 구리 두께를 1 cm로 가정하면 약 2만년 후에 처분용기를 구성하고 있는 구리가 모두 부식됨을 확인할 수 있다. 단, 이 값은 부식에 따라 부식제의 양이 감소하지 않고 지하수에서 부식제의 양이 일정하게 공급된다는 가장 보수적인 가정을 토대로 계산된 값이라 실제와 매우 다르며 처분용기의 수명은 이보다 더 길 것으로 예측된다는 점에 유의해야 한다.

3. 결 론

본 연구에서는 ABAQUS를 활용한 심지층 처분 환경에서의 구리부식모델을 개발하였다. 해석해, 수치모델과 비교 결과 및 실험실 장기부식실험과의 비교를 통해 ABAQUS를 통해 확산에 의한 부식제의 이동과 구리부식을 모델링 할 수 있음을 확인하였다. 장기부식실험결과를 토대로 매우 보수적인 경계 조건을 이용해 처분용기의 수명을 예측한 결과, 10 mm 두께의 구리용기의 수명은 약 2만년 정도임을 확인할 수 있었다. 단, 현재 사용된 조건이 매우 보수적이고 실제 처분환경과는 차이가 있어 이 값은 실제와 매우 다를 것으로 예측되며, 향후 이를 고려한 모델 개발이 필요하다. 또한 현재 모델에서는 정상부식만을 고려하였지만, 향후 점부식, 미생물 부식, 응력부식균열 등 다양한 부식 기작을 적용한 모델 개발이 필요할 것으로 보인다. 특히 처분용기 설치 시 발생하는 진동으로 인한 공명 등으로 인한 응력조건이 적용되는 경우 지체과괴 등의 현상이 없는 지에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

(1) 최희주 외, 고준위폐기물 심지층 처분장에서의 구리 처분용기 부식모델 개발, 한국원자력연구원, KAERI/TR-4986/2013