

경주 중·저준위 방사성 폐기물 처분장에서의 지하수 및 방사성 가스 유동 수치 모델링

김중휘, 김준모, 김창락*

서울대학교, 서울특별시 관악구 관악로 599

*한국방사성폐기물관리공단, 경기도 용인시 기흥구 중동 848-2

jung0209@hitel.net

1. 서 론

중·저준위 방사성 폐기물 처분장에서는 폐기물에서 수소나 이산화탄소 등의 방사성 가스가 장기간에 걸쳐서 발생하게 된다. 이렇게 발생된 가스는 처분장과 그 주변에서의 지하수 및 가스 압력의 변화를 유발하여 폐기물 처분장의 수리학적, 화학적 및 역학적 안정성에 매우 큰 영향을 끼칠 수 있다. 따라서 중·저준위 방사성 폐기물 처분장의 장기적인 처분 안정성을 확보하기 위해서는 가스 발생에 의한 지하수 및 가스 유동에 대한 정량적인 분석과 예측이 필수적이다. 본 연구에서는 경주 중·저준위 방사성 폐기물 처분장에서 발생하는 수소 가스에 의한 지하수 및 가스 유동 수치 모델링을 수행하고 다양한 수치 모델링 매개변수 변화에 따른 민감도를 분석하였다.

2. 수치 모델링 개요

본 연구에서 사용된 수치 모델은 범용 다차원 다상 열-수리학적 수치 모델인 TOUGH2[1]이며, 수소 가스의 물리학적 특성을 고려하기 위하여 EOS5 모듈을 이용하였다. 수치 모델링에서 사용된 모델 영역(model domain)의 크기는 가로 400 m, 세로 200 m이며, 모델 영역의 중심부로부터 처분장(repository), 콘크리트 라이너(concrete liner), 교란모암(disturbed host rock) 및 모암(host rock)으로 구성되어 있다(Fig. 1a). 처분장은 경상북도 경주시 양북면 봉길리 일대에 건설 중인 사일로 형태의 규모를 고려하였으며, 크기는 직경 23.6 m, 높이 50 m이다. 처분장 하부는 35 m 높이의 방사성 폐기물(radioactive waste), 상부는 15 m 높이의 분쇄암(crushed rock)으로 구성되어 있다. 처분장 외부의 콘크리트 라이너의 두께는 약 0.75-1.20 m이며, 교란모암의 두께는 약 10 m이다. 모델 영역은 7,140개의 절점과 6,968개의 요소로 이산화되었다(Fig. 1a). 사일로 내의 방사성 폐기물로부터 발생하는 수소 가스의 부피는 1,000년 동안 총 $7.67 \times 10^3 \text{ m}^3$ 이며, 이를 방사성 폐기물 단위 부피당 발생속도로 환산하면 1,000년 동안 $2.37 \times 10^{11} \text{ kg/m}^3/\text{s}$ 가 된다. 수치 모델링 기간은 수소 가스 발생 기간 1,000년을 포함하여 총 4,000년이다.

3. 수치 모델링 결과

수소 가스의 압력은 사일로 내에서 수소 가스가 발생함에 따라서 증가하고 사일로의 상부로 수소 가스가 유출된 후에는 수소 가스가 분포하는 지역에서 압력이 높게 나타난다(Fig. 1b). 초기에는 수소 가스가 낮은 질량 분율을 가지기 때문에 지하수에 용해된 상태로 존재하지만 시간에 따라서 질량 분율이 점차 증가하여 약 16년 이후부터는 기체상으로도 존재하게 된다. 수소 가스는 사일로 내부에서 부력에 의해 점차적으로 상부로 이동하며, 상부 분쇄암에 축적된다. 약 80년 이후에는 수소 가스가 인공 방벽(artificial barrier)인 콘크리트 라이너를 통과하여 교란모암 내에서 상부로 이동하다가 자연 방벽(natural barrier, geosphere)인 모암과의 경계에서 모이면서 지표로 이동하게 된다(Fig. 1c). 지하수에 용해된 수소의 질량 분율은 수소가 기체상으로 존재하는 지역과 사일로의 하부에서 높은 값을 보이며, 수소의 용해도와 질량이 상대적으로 작기 때문에 수치 모델링 기간 동안 수소의 용해에 의한 대류 현상은 발생하지 않는다(Fig. 1d). 또한 지하수에 용해된 수소의 질량 분율의 시간 및 공간적 분포는 처분장 주변에서 지하수 수질(특히 pH)의 급격한 변화가 발생할 수 있음을 보여준다. 수소 가스의 압력은 수소가 가스 상으로 존재하기 시작하는 약 16년 이후부터 점차적으로 증가하다가 수소 가스가 인공 방벽 및 자연 방벽을 통과하여 지표로 누출되는 기간 동안 감소한 후에 준 평형 상태를 유지한다.

1,000년 후에 수소 가스의 발생이 중단되면 압력이 순간적으로 감소하였다가 곧 회복되고 수치 모델링 종료 시점인 4,000년 까지 준 평형 상태를 유지한다. 수소 가스의 포화도는 초기에는 처분장 내에서 증가하고 수소 가스가 상부로 이동함에 따라서 분쇄암 및 분쇄암과 콘크리트 라이너의 경계에서 점차적으로 증가하며, 분쇄암의 최상부에서 최대값에 이른다. 수소 가스가 콘크리트 라이너를 통과하여 유출되

기 시작하면 분쇄암의 최상부에서 최대값에 이른 수소 가스 포화도는 급격하게 감소하고 대신에 상부의 교란 모암 및 모암에서 수소 가스 포화도가 증가하여 준 평형 상태를 유지하게 된다. 수소 가스 발생이 중단되는 1,000년 후에는 수소 가스의 포화도는 전 지점에서 비교적 긴 시간을 가지고 점진적으로 감소하는 양상을 보여준다.

한편 수치 모델링 매개변수(수소 가스의 발생 속도, 콘크리트 라이너의 고유투수계수, 모암의 고유투수계수) 변화에 따른 민감도 분석 결과 수소 가스의 발생 속도와 콘크리트 라이너의 고유투수계수가 지하수 및 수소 가스의 유동에 큰 영향을 주며, 특히 콘크리트 라이너의 고유투수계수가 수소 가스 압력 및 포화도의 시간에 따른 변화 양상과 최대값에 매우 큰 영향을 주는 것으로 나타났다.

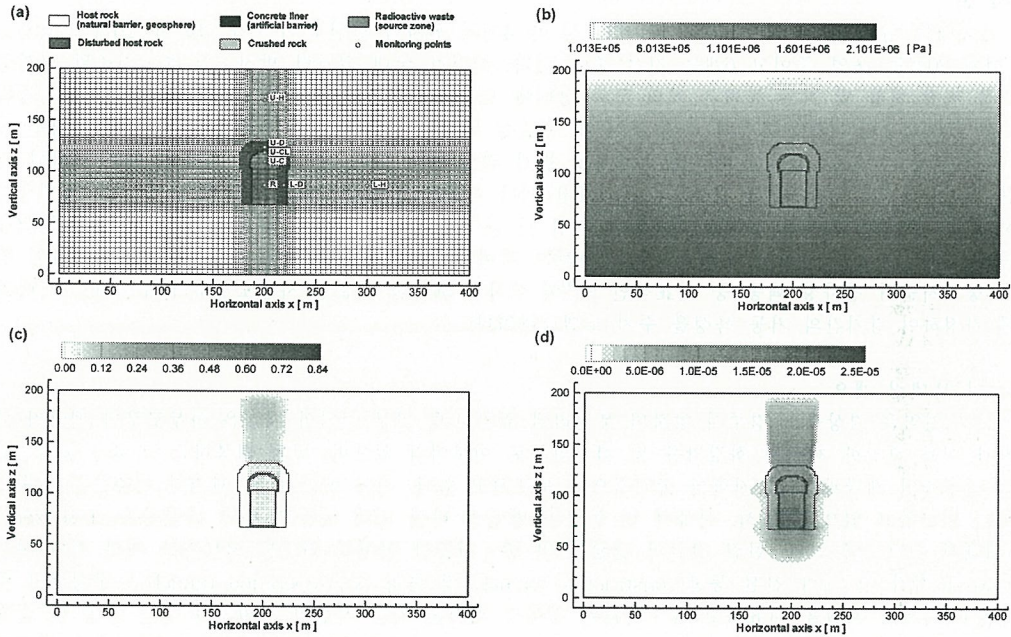


Fig. 1. (a) Vertical cross section and finite element mesh of the model domain with seven monitoring points and spatial distributions of (b) gas pressure, (c) gas saturation, and (d) mass fraction of gas dissolved in groundwater after 1,000 years of hydrogen gas generation from the radioactive waste in a silo (source zone).

4. 결 론

경주 중·저준위 방사성 폐기물 처분장에서 발생하는 수소 가스에 의한 지하수 및 가스 유동 수치 모델링을 수행하고 다양한 수치 모델링 매개변수(수소 가스의 발생 속도, 콘크리트 라이너의 고유투수계수, 모암의 고유투수계수) 변화에 따른 민감도를 분석하였다. 연구 결과는 방사성 폐기물로부터 발생한 수소 가스가 처분장과 그 주변의 지하수 및 가스 압력의 변화를 유발하며, 지하수 및 수소 가스의 유동에 수소 가스의 발생 속도와 콘크리트 라이너의 고유투수계수가 큰 영향을 끼침을 보여준다. 이러한 결과들은 중·저준위 방사성 폐기물 처분 시에 방사성 가스 발생에 의한 지하수 및 가스 유동을 정량적으로 이해하고 장기적인 처분 안정성을 확보하는 데 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 교육과학기술부의 원자력연구개발 중장기계획사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] Pruess, K., Oldenburg, C., and Moridis, G., TOUGH2 User's Guide, Version 2.0, Technical Report, No. LBNL-43134, 198 p., Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California, (1999).