

Effects of Groundwater Flow Rate Distribution at a Disposal Depth on Migration of Radionuclides Released from Potential Deposition Holes

처분 심도의 지하수 유량이 처분공에서 누출될 것으로 가정된 방사성핵종의 이동에 끼치는 영향 평가

Nak-Youl Ko*, Jongtae Jeong, and Kyong-Su Kim

Korea Atomic Energy Research Institute, 111 Daedeok-daero 989, Youseong-gu, Daejeon, Korea

고낙열*, 정종태, 김경수

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

(Received July 21, 2014 / Revised September 1, 2014 / Approved September 11, 2014)

Using results of groundwater flow system modeling for a hypothetical deep geological repository site, a distribution of groundwater flow rates at the disposal depth was analyzed and a method of applying this distribution to a safety assessment for a disposal of radioactive wastes was suggested. The distribution of groundwater flow rates was produced by hydraulic heads simulated from regional and local scale groundwater flow models for the hypothetical disposal site. The flow rates at the locations where deposition holes would be located were estimated. These rates were normalized by the maximum of the flow rates in order to probabilistically illustrate a possibility of canister failures at the deposition holes. From the normalized distribution, probabilistic expectations for mass discharges of radionuclides released from the canisters assumed to be failed were calculated and compared with those deterministically estimated under the assumption that the canisters at the same deposition holes were definitely failed. The suggested method can be contributed to constructing a methodology for safety assessment of a geological repository by reflecting natural conditions of a disposal site in more detail.

Keywords: Groundwater flow at disposal depth, Groundwater flow simulation, Probabilistic analysis, Selection of a deposition hole

가상의 심지층 처분 부지에서 이루어진 지하수 유동 모의 결과를 이용하여 처분 심도의 지하수 유량 분포를 분석하고 그 결과를 처분 안전성 평가에 이용할 수 있는 방안을 제시하였다. 처분 심도의 지하수 유동량은 가상의 처분 부지를 대상으로 한 광역 및 국지적 지하수 유동 모의 결과의 지하수 유동 분포를 이용하여 분석하였다. 지하수 유동량 분포를 이용하여 처분공 위치의 지하수 유동량을 분석하고 최대값을 기준으로 지하수 유동량을 표준화하여 처분공에서의 처분 용기 파손 가능성을 확률적으로 도시하였다. 확률적으로 제시된 처분 용기의 파손 가능성을 이용하여, 처분 용기로부터 누출이 일어날 것으로 가정된 위치에서 지표 환경으로 이동하는 방사성 핵종의 이동량에 대한 확률론적 기대값을 계산하여 결정론적으로 평가된 이전 연구 결과와 비교하였다. 이런 평가 방법은 현장 조건을 더욱 많이 반영할 수 있는 안전성 평가 방안 구축에 기여할 수 있을 것으로 생각된다.

중심단어: 처분 심도의 지하수 유동량, 지하수 유동 모의, 확률론적 평가, 처분공의 위치 선정

*Corresponding Author.

Nak-Youl Ko, Korea Atomic Energy Research Institute, E-mail: nyko@kaeri.re.kr, Tel: +82-42-868-4929

1. 서론

원자력 발전은 화력이나 수력 및 태양광과 같은 다른 발전 방식에 비해 경제적인 측면에서 비교적 적은 비용으로 전기를 생산할 수 있다는 장점을 갖고 있지만, 사용후핵연료와 같은 고준위 방사성폐기물을 발생시켜 그에 대한 해결 방안을 강구해야 한다는 문제점도 안고 있다. 고준위 방사성폐기물은 매우 위험하며 그 영향이 수 만년 이상 장기간 지속될 수 있어 인간의 보건 및 자연 환경에 심대한 악영향을 끼칠 수 있기 때문에, 폐기물의 위험도가 일정 수준 이하로 떨어질 때까지 인간의 생활환경과 지표의 생태계 환경에서 격리시키려는 시도가 여러 나라에서 이루어지고 있다[1-3]. 이를 위해 다양한 처분 방법이 제시, 검토되고 있는데, 현재 우리나라에서는 지하 깊은 곳에 고준위 폐기물을 처분하는 방식인 심지층 처분 연구가 이루어지고 있다[4,5].

심지층 처분의 핵심은 처분된 고준위 방사성폐기물에 포함된 방사성 핵종이 방사성 붕괴를 일으켜 위험도가 일정 수준 이하로 떨어질 때까지 처분용기 안에 격리되거나, 불의의 상황에 의해 처분용기에서 방사성 핵종이 누출되어 지표 환경에 도달하더라도 그 시점에는 방사성 붕괴로 인해 이미 위험도가 원하는 수준 이하가 되도록 핵종의 이동을 지연시키는 것이다. 따라서 자연 상태의 지하 환경에서 핵종의 이동 매체가 될 수 있는 지하수의 흐름이 매우 적은 결정질 암반이나 셰일 등의 미세한 입자로 형성된 퇴적층이 처분 부지로 선호되고 있고, 폐기물 처분 후에 지하에 건설된 처분 시설의 공간을 다시 채워 폐쇄시키기 위해 벤토나이트(bentonite)가 주 구성물질인 완충재(buffer)에 관한 연구가 활발히 진행되고 있기도 하다. 또한 방사성폐기물에 포함된 방사성핵종의 누출을 최소화할 수 있는 처분용기의 개발 및 생산에도 많은 연구가 이루어지고 있다[2-5].

누출된 방사성 핵종의 이동을 지연시키기 위해 완충재나 자연 방벽 등의 여러 가지 요소가 심지층 처분 방식에서 고려되고 있지만, 가장 중요하게 고려되어야 하는 것들 중에 하나는 핵종이 처분 용기에서 누출될 가능성이 적은 지점을 처분공(deposition hole)의 위치로 잡아야 한다는 것이다. 처분공에 놓인 처분용기에서 방사성 핵종이 누출되는 상황은 여러 가지로 생각해 볼 수 있다[2,6]. 우선 처분용기가 기계적인 충격을 받는 경우인데, 이는 수 만년 이상 지속되는 지구 조 운동(tectonics) 또는 지진 활동에 의한 것을 생각할 수 있

다. 하지만 이런 사고 상황은 부지 선정 과정에서 지진대와 인접한 부지를 제외시켜서 사고가 발생할 가능성을 극히 낮은 수준으로 만들 수 있다. 인간의 활동으로 인해 처분용기가 파손되는 경우도 생각해 볼 수 있으나, 그 가능성이 매우 낮기 때문에 참고적으로 고려만 하는 해외 사례도 있다[6-8].

사고 상황 이외에, 오랜 시간동안 처분 용기에 영향을 줄 수 있는 요소는 지하수에 의해 발생하는 부식 과정이다[6,7]. 고준위 폐기물에 대한 처분 부지를 선정하고 지하 연구 시설에서 처분 시스템을 연구 중인 스웨덴이나 핀란드에서는 처분 용기를 주철과 구리로 생산할 계획을 갖고 있는데, 심지층 환경에서 환원 조건을 갖는 지하수의 화학적 특성으로 인해 이런 재질로 제작되는 처분 용기에 부식이 발생할 수 있고, 여기에 주변 암반의 광물 조성 및 미생물 등에 의한 영향이 추가되어 부식 속도가 증가될 수 있다고 알려져 있다[7,9-12].

이런 현상을 일으키는 가장 근본적인 요소는 지하수의 존재이며, 처분공에 유입되는 지하수의 유량이 많을수록 부식과 관련된 여러 현상이 더 가속화될 수 있는 가능성이 크다[9]. 심지층 처분 방식에서 자연 방벽(natural barrier)으로 구분된 주변 암반의 역할은 처분 시설을 구조적, 역학적으로 지지해주는 것 이외에 핵종의 이동을 지연시키는 것이며, 이런 특성은 지하수 유량이 적을수록 뚜렷하게 나타나기 때문에, 지하수 유량에 따라 처분공의 위치를 선정해야 할 필요가 있다. 지하수 유량이 많을수록 처분공을 채우고 있는 완충재를 침식시킬 가능성이 크고, 침식된 공간을 통해 처분 용기에 접촉하는 지하수의 양이 예상보다 많아져서 용기의 부식을 촉진시킬 수 있기 때문에 핀란드의 처분 시설 설계 과정에서는 처분공으로의 지하수 유입량이 고려되기도 한다[10]. 특히, 처분 시설에 대한 안전성 평가 과정에서는 처분공에서 누출되는 방사성 핵종이 인간 및 자연 환경에 끼칠 수 있는 방사선적 영향을 평가하게 되는데, 다른 곳에 비해 누출이 잘 발생할 수 있는 처분공을 대상으로 안전성 평가가 이루어지면 처분 부지의 자연 환경을 고려한 평가가 이루어질 수 있다.

본 논문의 목적은 지하수 유동 모의 결과를 통해 가상의 처분 시설의 처분공 위치에 해당하는 처분 심도의 지하수 유동량을 분석하고, 유동량 자료를 방사선적 안전성 평가에 어떻게 이용할 것인가를 고려하는 것이다. 가상의 처분장 환경은 한국원자력연구원(Korea Atomic Energy Research Institute, KAERI) 부지 내의 심지층 처분 연구를 위한 지하 환경 연구 시설인 KURT(KAERI Underground Research Tunnel)

부지의 자료를 이용하였다. KURT 부지의 지하수 유동 모의 자료를 바탕으로 처분 심도의 지하수 유동 양상을 분석하여 처분공 위치에서의 지하수 유동량을 평가하였다. 평가된 지하수 유동량이 안전성 평가에 어떻게 이용될 수 있는가를 제시하고 그로 인한 영향을 이전 연구 결과를 이용하여 제시하였다. 마지막으로, 처분 부지의 자연 조건을 보다 상세히 반영하는 처분 안전성 평가를 수행하기 위해 지하수 유동량 평가 결과가 기여할 수 있는 방법에 대해 고찰하였다.

2. 연구 지역

처분 심도가 되는 지표면 이하 500 m 지점의 지하수 유동량에 관한 자료를 작성하기 위해, KURT 부지 및 부근 지역의 지표 및 관측공에서 조사된 자료를 활용하여 해당 지역의 지하수 유동계를 모의한 이전 연구 자료를 이용하였다 [13]. KURT 부지는 고준위 폐기물의 처분 방식으로 연구 중인 선진핵주기 고준위폐기물 처분시스템을 위한 관련 자료를 확보하고 필요한 시험이 이루어지는 곳으로, 본 연구에서 필요한 자료를 이용할 수 있어 연구 지역으로 선정하였다 [5]. KURT 주변 지하수 유동 환경은 주위의 지표수계인 금강과 갑천을 지하수 유동의 경계로 하는 광역 규모에 대해 우선적으로 모의가 수행되었고, 그 결과를 이용하여 좀 더 작

은 규모의 영역에 해당하는 지하수 유동계가 모의, 분석되었다. KURT 부지의 대략적인 위치는 Fig. 1에 표시된 바와 같고, 규모에 따른 지하수 유동계는 Fig. 2와 같이 분석되었다.

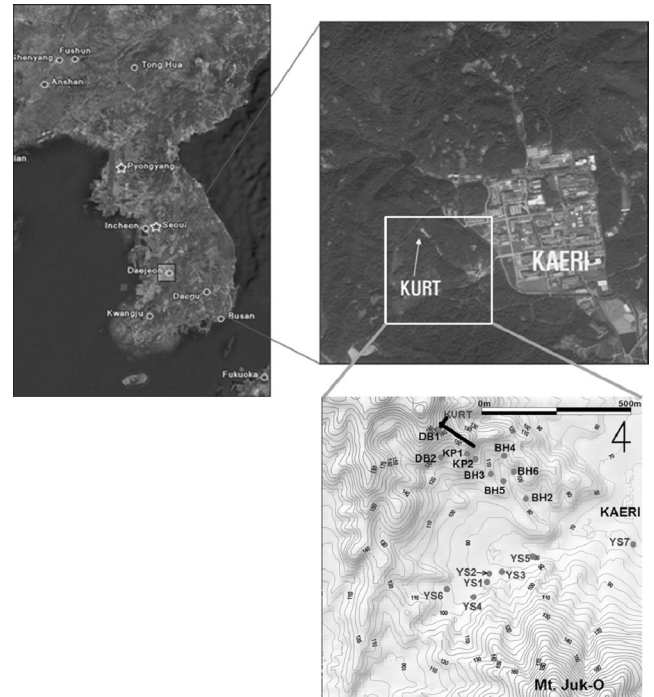


Fig. 1. Locations of the study site. Symbols and letters in the lower map represent observation boreholes [12].

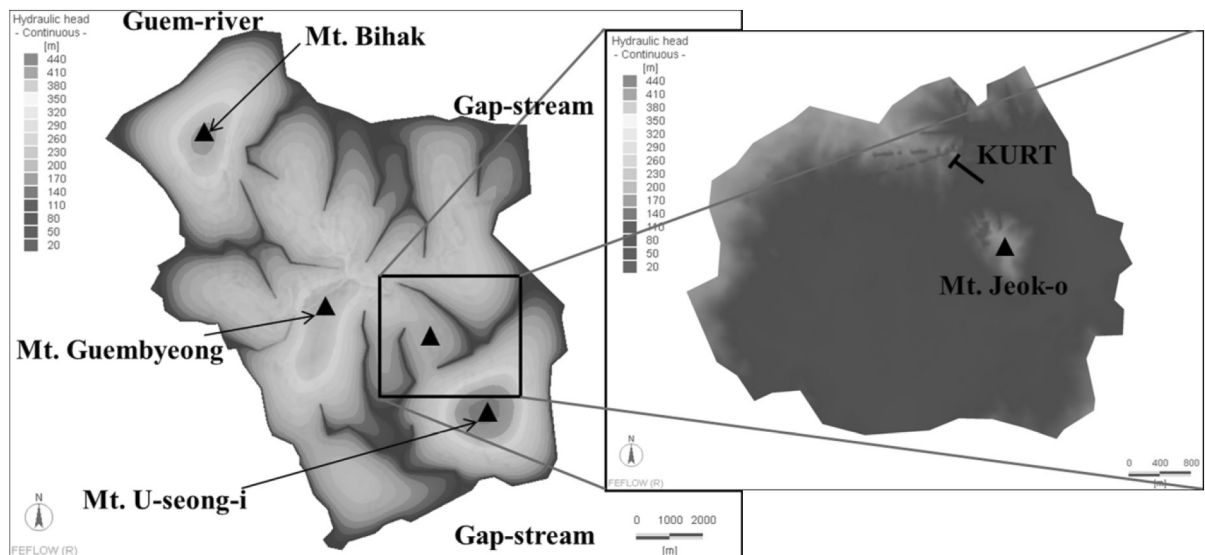


Fig. 2. Hydraulic heads distributions in the regional and local scale groundwater flow models calibrated around the KURT site [12].

광역 지하수 유동계에서의 지하수위 분포는 지표의 고도와 거의 일치하는 경향을 보였으며, KURT 주변의 비교적 큰 단열 구조가 지하수 유동 모에 반영된 국지 영역(local area)에서는 단열에 의한 영향이 지하수위 분포에 일부 영향을 끼치고 있다(Fig. 2).

3. 처분 심도에서의 지하수 유동량 분포

처분 심도에서 지표로의 지하수 이동 경로는 Fig. 2에 나와있는 지하수 유동 모의 결과에서 획득한 지하수두 자료를 이용해 각 지점 사이의 수두구배(hydraulic gradient)를 구하고, 계산된 방향 및 유속을 이용하여 이동 경로를 계산하는 입자 추적(particle tracking) 방식을 이용해 결정하였다. Fig. 3은 가상의 처분 시설로 선정된 위치에서 지표로 이동하는 지하수의 이동 경로를 입자 추적 방식을 이용하여 산정한 결과이다[12]. 이전 연구에서는 다른 이동 경로에 비해 비교적 이동 거리가 짧고, 단열을 따라 이동하기 때문에 지표에 이르는 시간도 다른 경로에 비해 적게 걸리는 A, B, C 경로에 대해, 해당 지점에서 누출될 가능성이 있는 핵종들이 지표로 도달하는데 걸리는 시간을 TDRW(Time-Domain Random Walk) 기법을 이용하여 계산하였다[4,14]. TDRW 기법은 일정한 경로를 지나가는 입자가 해당 경로를 통과하는데 걸리는 시간을 시간 영역(time-domain)에서 추계론적(stochastic)으로 계산하는데 이용된다[14].

이전 연구에서 제시된 계산 결과는 처분 시설의 경계에 해당하면서 지표까지의 이동 거리가 다른 위치에 비해 짧은 지점들을 누출된 방사성 핵종이 이동을 시작하는 시작 위치로 가정하여 계산되었다. 하지만 앞에서 서술한 대로, 기계적인 응력(stress) 이외에 처분 용기의 부식으로 인해 방사성 폐기물에서 핵종이 누출될 경우 가장 큰 요인이 될 수 있는 것은 지하수의 유량이다. 유량이 클수록 처분용기의 표면과 접촉하는 물의 양이 많아질 수 있는데, 이런 경우 지하수 내에 존재하여 처분 용기와 접촉하게 되는 산소나 여러 가지 이온들의 양도 증가하게 되어서, 그로 인해 발생하는 부식의 양도 커질 수 있기 때문이다[11,12]. 따라서 단순히 이동 거리가 짧거나 이동에 걸리는 경과 시간이 적은 지점을 선택하는 것 이외에 핵종이 누출될 가능성이 높은 구역을 안전성 평가의 대상이 되는 핵종의 누출 위치로 선정하는 것도 처분 용

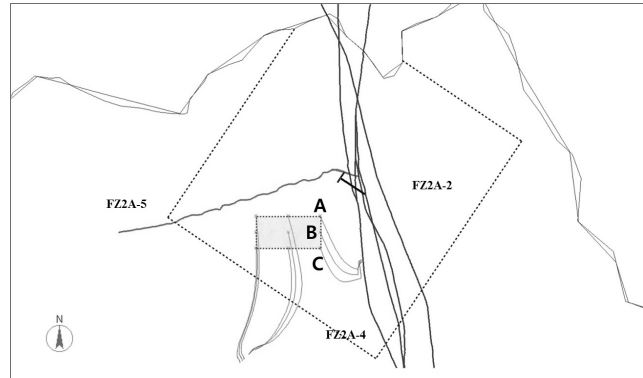


Fig. 3. The three positions selected for obtaining flow distances and times of groundwater, which were used in transport simulations of hypothetical radionuclides [12]. The letters represent fracture zones in the vicinity of the KURT facility.

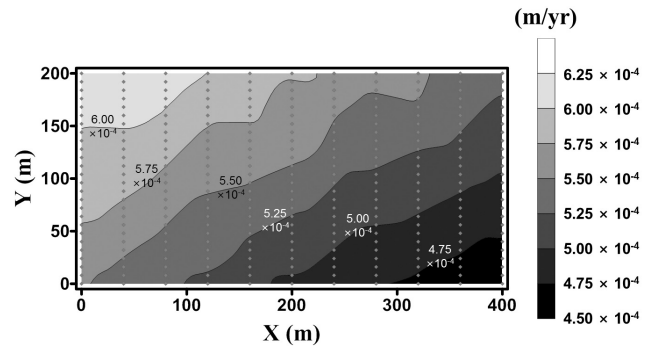


Fig. 4. Distribution of groundwater flow rates at the disposal depth. The symbols show locations of deposition holes.

기의 파손으로 인해 핵종이 유출된다는 점에서 생각해 보면 보다 현실적인 안전성 평가를 수행하기 위해 고려할 수 있는 대상이 될 수 있다.

Fig. 4는 Fig. 3에서 붉은 색 사각형 형태로 제시된 가상의 처분 시설 구역의 지하수 유동량 분포를 나타내고 있다. 이 분포는 Fig. 2에서 제시된 국지 영역 규모의 지하수 유동 모의 결과를 이용하여 작성되었다. Fig. 4의 지하수 유동량 분포는 단위 면적에 대한 유동량을 나타내는 것으로, discharge rate, 또는 Darcy velocity라고도 불리며, Darcy의 법칙에 따라 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$q = K \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad (1)$$

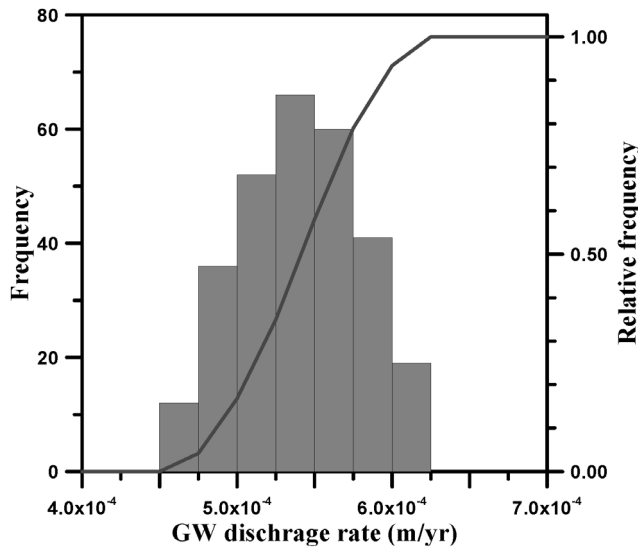


Fig. 5. Histogram of the groundwater flow rates and cumulative distribution of relative frequency for the deposition holes along the discharge rate.

이 때, q 는 Darcy velocity, K 는 수리전도도, h 는 지하수 두(hydraulic head), l 은 거리이다. Fig. 4를 보면 지하수 유동량은 북서쪽이 가장 높고 남동쪽으로 갈수록 적어지는 비교적 단순한 경향을 보인다. 이는 지하수 모의 단계에서 단열을 제외한 구역, 즉 암반으로 분류된 모의 영역의 수리전도도 자료가 불균질성을 특성화하기에는 충분하지 않아서, 암반 전체의 수리적 특성을 대표할 수 있는 하나의 값을 이용하게 되어 수리전도도를 균일하게 가정했기 때문으로 생각된다.

Fig. 4의 지하수 유동량 분포도에 표시된 지점은 처분 용기가 놓일 위치로 지정된 곳이다[4]. 이 지점에서의 지하수 유동량 분포를 Fig. 5의 히스토그램으로 나타내었다. 처분공 위치에서 추정된 지하수 유동량의 최대값은 6.20×10^{-4} m/yr로 전체 영역의 최대값인 6.36×10^{-4} m/yr 와 거의 같다. 이 값을 이용해 최대값이 나온 위치에서 처분공을 설치할 경우 처분공에서 유출될 것으로 예상되는 지하수의 유량은 2011년의 KAERI 설계(KAERI, 2011)를 이용하여 계산하면 5.36×10^{-5} L/min인데, 아직 우리나라에서 처분공으로의 지하수 유입량에 대한 기준이나 관련 연구는 이루어지지 않고 있다. 여기에서 계산된 결과와 비교할 만한 기준을 핀란드의 Posiva 사에서 제시하였는데, Posiva에서 처분공의 위치에 대한 적합성 여부를 진단할 때의 기준으로 이용하는 0.1 L/min이라는 값에 비해 본 연구에서 계산된 유입량은 매우 작은 값이다[9].

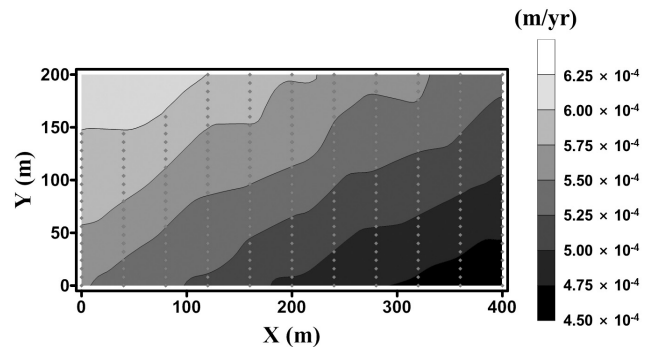


Fig. 6. Area of the deposition holes banned by the assumed criterion of groundwater flow rate ($= 6.0 \times 10^{-4}$ m/yr).

다만 이 연구에 이용된 지하수 유동 모의 모델은 암반 영역의 수리전도도를 균일하게 주었고, 암반의 특성을 반영하기 위해 매우 작은 값을 부여하였다. 또한 핀란드의 조건은 이미 지하 공간에 처분시설이 건설된 상태인데 KURT 부지에서 지하수 유동 모의는 이런 시설에 의한 영향이 반영되지 않았다. 따라서 계산된 처분공으로의 지하수 유입량을 핀란드의 사례와 직접적으로 비교하는 것은 큰 의미가 없다고 볼 수도 있다. 하지만 처분공에 지하수가 유입되어 처분 용기의 부식이 실제로 발생하는 시점은 처분 시설이 폐쇄되어 운영 중에 불포화 상태로 유지되던 처분 시설이 다시 지하수로 포화된 이후가 되므로, 처분 시설이 건설되지 않아 처분 심도의 지하수가 포화되어 이동하는 현재의 상태와 거의 비슷한 지하수 유동량이 나타날 가능성이 크다. 따라서 현재의 지하수 유동량을 분석한 자료도 처분공의 입지를 고려하는데 충분한 근거가 될 수 있다. 만약 처분 용기가 놓일 처분공 위치의 지하수 유동량이 6.0×10^{-4} m/yr 이하가 되어야 한다는 조건이 주어진다면, 현재의 위치 중에서 7%가 처분 위치에서 제외될 것이며, 처분장의 형태도 변화되어야 할 것이다(Fig. 6).

4. 지하수 유동량 분포를 반영한 핵종 이동량 계산

처분공 위치에서의 지하수 유동량 분포에 대한 분석 자료는 처분 시설의 안전성 평가에도 활용될 수 있다. 심지층 처분 방식으로 처분 안전성을 평가하려고 하는 부지들 중에 핀란드의 안전성 평가 과정을 보면, 기본 시나리오에서는 최

소한 하나의 처분용기가 성능을 잃고 방사성 핵종을 누출시키는 것으로 가정하여 그로 인해 지표의 사람과 생태계가 받을 영향을 평가하도록 되어 있다[6,9]. 이 때, 핵종의 누출이 일어나는 처분공을 모든 처분공에 대해 임의로 선정하는 것 보다는 누출이 잘 일어날 수 있는 환경에 있는 처분공 중에서 선정하는 것이 현장 조건을 보다 잘 반영하는 평가 방안이 될 수 있다. 처분 용기의 부식이 핵종의 누출을 일으키는 주요 요인이라고 한다면, 지하수 유동량의 분포는 처분용기의

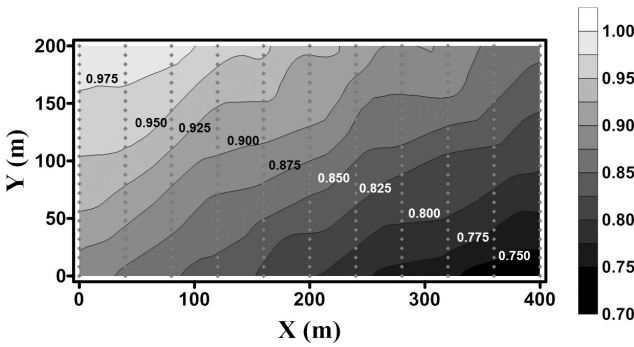


Fig. 7. Normalized distribution by the maximum of groundwater flow rates at positions of the deposition holes.

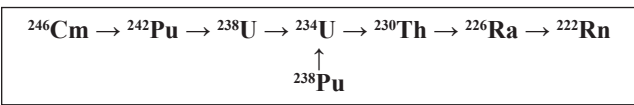
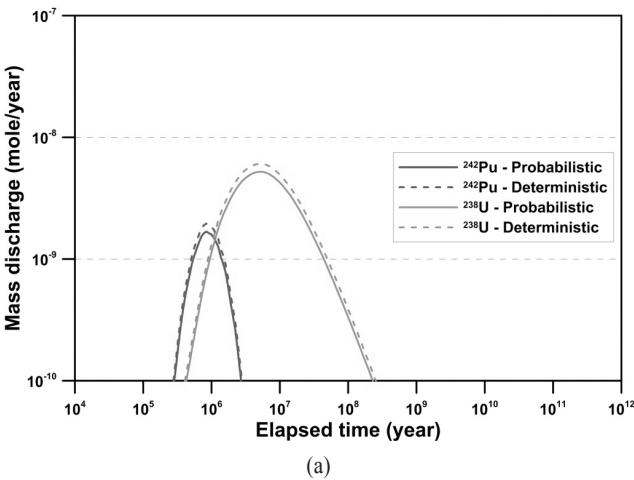
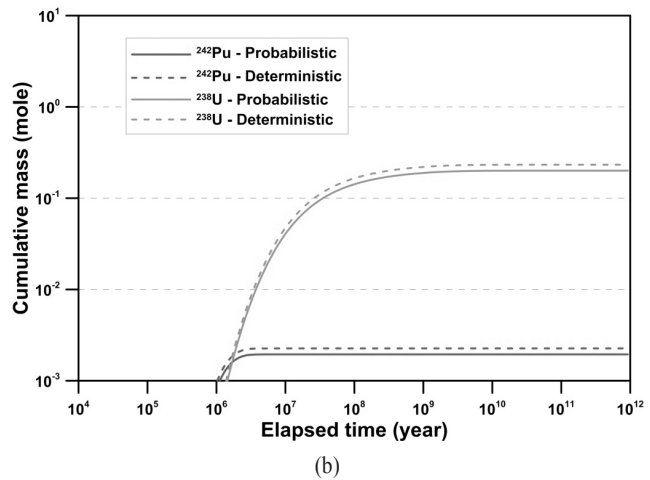


Fig. 8. Decay chain used in this study (modified from [12]).



(a)



(b)

Fig. 9. Comparisons of radionuclide mass discharges obtained by the assumption of deterministic failure case and the probabilistic failure case, which are represented by expectations of the mass discharges ((a): breakthrough curves of mass discharges, (b): cumulative mass discharges).

부식이 잘 일어날 수 있는 위치의 선정에 이용할 수 있는 자료가 될 수 있다. 최소한 하나의 처분용기가 부식되어 방사성 핵종이 누출된다는 시나리오를 세운다면, 지하수 유동량이 가장 크게 나타난다고 평가되는 처분공에서 핵종이 누출된다고 가정하는 것이 가장 현실적일 수 있다. 또한 하나 이상의 처분 용기가 부식에 의해 파손되는 상황을 고려해야 한다면, 처분공 위치에서 나타나는 지하수 유동량을 최대값으로 표준화(normalization)시킨 값을 일종의 누출 확률로 가정하여 누출이 일어날 처분공의 위치를 선정하는 것도 가능하다. Fig. 7은 처분용기의 위치에서 나타나는 지하수 유동량 중 최대값으로 전체 지하수 유동량을 표준화한 분포도이다.

Table 1. Half-lives, distribution coefficients, and initial mass of the radionuclides (modified from [12])

Component	Half-life (yr)	Distribution coefficient (K _d , m ³ /kg)	Initial mass (mole)
²⁴⁶ Cm	4.73 × 10 ³	4.00 × 10 ⁻²	8.66 × 10 ⁻⁵
²⁴² Pu	3.75 × 10 ⁵	1.50 × 10 ⁻²	8.43 × 10 ⁻²
²³⁸ U	4.47 × 10 ⁹	4.30 × 10 ⁻²	6.22 × 10 ⁻⁶
²³⁸ Pu	8.77 × 10 ¹	1.50 × 10 ⁻²	2.53 × 10 ⁻²
²³⁴ U	2.45 × 10 ⁵	4.30 × 10 ⁻²	9.64 × 10 ⁻³
²³⁰ Th	7.70 × 10 ⁴	1.31 × 10 ⁻¹	6.04 × 10 ⁻⁷
²²⁶ Ra	1.60 × 10 ³	2.40 × 10 ⁻⁴	7.12 × 10 ⁻¹¹
²²² Rn	1.05 × 10 ⁻²	0	None

Fig. 7을 보면, 이전 연구에서 핵종의 누출 지점으로 선정된 세 지점(Fig. 2)의 지하수 유동량은 최대값에 비해 각각 A가 86%, B가 81%, C가 74%이다.

표준화한 값을 누출이 발생할 확률로 가정하고, 세 지점에서 누출될 핵종의 양에 대한 기대값(expectation)을 구하여 결정론적인 누출이 일어난다고 가정한 이전 연구 결과[12]와 비교하였다. 비교에 이용된 방사성 핵종 및 붕괴로 인해 생성되는 핵종들에 의해 형성되는 붕괴 사슬은 Fig. 8과 같고, 핵종들의 반감기, 흡착 정도를 나타내는 분배계수, 초기 누출량은 Table 1에 정리하였다. 계산된 기대값은 이전 연구 결과에서 계산된 핵종 유출량보다 감소하는 것으로 나타났다(Fig. 9). 붕괴사슬에 속한 핵종 중에서 지표 유출량의 대부분을 차지하는 ^{242}Pu 와 ^{238}U 의 유출량을 비교해 보면, 결정론적으로 계산된 최대 시간당 유출량이 각각 1.96×10^9 mole/yr, 6.06×10^9 mole/yr인데 비해 확률론적으로 계산된 기대값의 최대 시간당 유출량은 각각 1.68×10^9 mole/yr, 5.21×10^9 mole/yr로 감소된 것으로 나타났다. 누적 유출량도 각각 2.26×10^3 mole, 2.33×10^1 mole에서 1.94×10^3 mole, 2.00×10^1 mole로 줄어드는 것으로 계산되었다(Fig. 9).

5. 결론

가상의 심지층 처분 부지에서 이루어진 지하수 유동 모의 결과를 이용하여 처분 심도의 지하수 유량 분포를 분석하였다. 처분 용기의 파손이 지하수를 매개로 한 부식 과정에 의해서만 발생한다고 가정하면, 지하수 유입량이 많을수록 용기의 파손이 발생할 가능성도 높아질 수 있기 때문에, 지하수 유입량을 이용하여 처분 용기의 파손 가능성이 다른 곳보다 높게 나타나는 처분공의 위치를 분석하였다. 그리고 지하수 유입량을 표준화하여 하나 이상의 처분 용기가 부식에 의해 파손되는 경우에 대해, 각 처분공 위치별 누출 가능성을 지하수 유동량을 바탕으로 평가하였다. 이 결과를 이용하여 이전 연구에서 반드시 누출된다고 가정한 처분공 위치에서 흘러나오는 방사성 핵종이 지표 환경으로 이동하는 양상을 확률론적 기대값으로 평가하여 이전 결과와 비교하였다.

처분공 내부에 있을 처분 용기가 지하수와 접촉하여 부식이 발생하는 환경은 처분 시설이 지하수로 재포화된 후가 된다. 따라서 처분 시설의 폐쇄가 원래의 계획에 따라 완벽

히 이루어질 경우, 처분 심도의 지하수 유동 환경은 아직 처분 시설이 건설되지 않은 조건과 거의 유사하게 될 수 있다. 그래서 처분 심도에 대한 현장에서의 관측이 없는 상태에서 지하수 유동량 분석 결과를 처분장 폐쇄 후의 지하수 유동계 분석에 이용할 수 있다. 현재 지하수 유동량이 많은 곳은 처분장 폐쇄 후에도 많은 양의 지하수가 지나가게 될 가능성이 크기 때문이다. 이를 근거로 하여 처분 용기 부식에 대해 보다 안전한 처분공 위치를 선정하는 방법을 비교적 간단하게 제시해 보았다. 다만 지하수 유동량 분포가 매우 단순하게 분석되었는데, 이는 현장의 수리적 특성에 관한 불균질성을 나타내는 자료가 충분히 갖추어진다면 보다 현실적이고 복잡한 지하수 유동 환경이 표현될 것이라고 생각한다.

처분공에서의 지하수 유동량을 바탕으로 처분 용기의 파손 확률을 산정하고, 그것을 이용한 확률론적 기대값으로 처분공에서 누출될 수 있는 핵종의 이동량을 계산해 보았다. 기존 연구의 결과와 비교해보면, 해당 지점의 처분 용기가 반드시 파손된다고 가정한 경우에 비해 핵종 이동량이 감소하는 것으로 나타나게 된다. 이런 평가 방식은 위험성 평가(risk assessment) 측면에서 볼 때, 발생할 수 있는 사건이 끼칠 수 있는 영향을 표현하는 방식이라고 볼 수 있다. 핵종의 이동량을 산정할 경우에 처분 용기의 파손 확률을 고려해야 하는 상황이라면, 본 연구에서 제시된 핵종 이동량의 기대값을 계산하는 방안이 유효할 것으로 생각된다. 예를 들면, 핀란드의 처분 안전성 평가에서처럼 정상적인 상황에서 일부의 처분 용기만이 파손된다는 시나리오를 채택하는 경우에 [6], 파손이 발생할 확률과 파손에 의한 핵종 이동량을 함께 고려하여 그 기대값을 안전성 평가에 이용할 수 있을 것이다. 다만, 처분 용기는 지진과 같은 지구조 운동에 의해 발생하는 기계적인 응력에 의해 파손될 가능성도 있으며, 처분공 주변에 존재할 수 있는 단열대 및 배경 단열과 같은 미세 구조의 크기와 방향이 응력에 의한 처분 용기의 파손을 촉진시킬 수도 있기 때문에 그런 영향들이 함께 고려될 경우 실제로 나타날 수 있는 현상에 가까운 상황을 고려한 안전성 평가가 가능할 것으로 생각된다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로

한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(원자력연구개발사업, No. 2012M2A8A5025589).

REFERENCES

- [1] IAEA, Disposal of Radioactive Waste - Specific Safety Requirements, IAEA Safety Standards Series No. SSR-5, IAEA (2006).
- [2] SKB, Data Report for the Safety Assessment SR-Site, SKB TR-10-52, SKB (2010).
- [3] Posiva, Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto - Synthesis 2012, POSIVA 2012-12, Posiva Oy (2012).
- [4] KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute), "Geological Disposal of Pyroprocessed Waste from PWR Spent Nuclear Fuel in Korea," KAERI/TR-4525/2011, KAERI (2011).
- [5] H.J. Choi, J.Y. Lee, and J. Choi, "Development of Geological Disposal Systems for Spent Fuels and High-level Radioactive Wastes in Korea," Nuclear Engineering and Technology, 45(1), pp. 29-40 (2013).
- [6] Posiva, Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto - Formulation of Radionuclide Release Scenarios 2012, POSIVA 2012-08, Posiva Oy (2013).
- [7] SKB, Radionuclide transport report for the safety assessment SR-Site, SKB TR-10-50, SKB (2010).
- [8] SKB, Handling of future human action in the safety assessment SR-Site, SKB TR-10-53, SKB (2010).
- [9] Posiva, Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto - Assessment of Radionuclide Release Scenarios for the Repository System 2012, POSIVA 2012-09, Posiva Oy (2012).
- [10] Posiva, Olkiluoto Site Description 2011, POSIVA 2011-02, Posiva Oy (2012).
- [11] SKB, Corrosion calculations report for the safety assessment SR-Site, SKB TR-10-66, SKB (2010).
- [12] SKB, Critical review of the literature on the corrosion of copper by water, SKB TR-10-69, SKB (2010)
- [13] K.S. Kim, K.W. Park, G.Y. Kim, and H.J. Choi, "Development of Advanced Korean Reference HLW Disposal System - Site Characteristics", KAERI/TR-4265/2011, KAERI (2011).
- [14] N.Y. Ko, J. Jeong, K.S. Kim, and Y. Hwang, "Travel time of radionuclides released from hypothetical multiple source positions in the KURT site", JNFCWT, 11(4), pp. 281-291 (2013).