

Adjoint 방법론을 이용한 확률론적 지하수 유동 경로 평가

황 용수, 장 태수*, 조 영민*, 강 철형, 한 경원

한국원자력연구소 심지층처분시스템

* 충남대학교 환경공학과

yshwang@kaeri.re.kr

요약문

고준위 방사성 폐기물 영구처분 안전성을 평가하기 위하여 입력 자료로 처분장 주변 각 암반에서의 지하수 유동 속도 및 유동 시간이 요구된다. 이러한 유동 속도와 시간은 대부분의 경우 단일 값이 요구되지만 고준위 방사성 처분의 경우 지하 매질의 불확실성을 고려하기 위하여 확률론적 분석이 요구된다. 지하수 유동 속도 및 시간이 확률밀도함수로 표시되기 위해서는 기존의 방법에서는 수리 해석의 입력 인자 값들을 변화시키면서 반복적인 계산을 수행하는 방법이 사용되었다. 그러나 이러한 방법론의 한계를 극복하기 위해 최근 섭동 이론을 이용한 adjoint 방법론이 사용되고 있는 바 이를 이용하여 가상 처분장에서의 지하수 유동 속도와 시간을 확률론적으로 해석하였다.

1. 서론

방사성폐기물 처분 사업에서 지하수 유동 모델링은 처분장이 위치할 포화 암반대의 특성을 세부 부지 특성 조사를 통해 규명하여 이를 바탕으로 미래에 발생할 현상을 예측하여 침투 지하수를 통하여 유출되는 오염 물질의 생태계까지의 유동 경로를 평가하여 환경 영향을 정량적으로 평가할 수 있는 입력 자료들을 제공하고 동시에 가장 경제적이고 환경 친화적인 처분장을 설계 관리하는데 그 목적이 있다. 미국 NRC의 규정[1]에 의하면 처분장 후보지로부터 생태계까지 처분장이 들어서기 전 자연 상태에서 지하수 유동 시간은 적어도 10,000년을 넘어야 한다. 이와 같은 환경 규제치를 만족함을 증명하기 위해 다양한 수치 해석 모델을 이용해서 유해 폐기물질 저장소 근방에서의 지하수 및 유해 물질 이동을 정량적으로 평가하는 연구가 중요하다. 그러나 지하 암반에서의 지하수 및 물질 이동을 결정짓는 암반의 투수 계수 및 분산 계수 등과 같은 인자들에는 많은 불확실성이 내포되어 있다.

본 연구에서는 국내에서 연구된 고준위 방사성 처분 개념을 대상으로 이와 같은 암반에서의 물질 이동 관련 입력 인자들의 불확실성이 지하수 유동 경로 및 시간에 대하여 어떠한 영향을 미치는가를 두 adjoint 방법론[2]을 사용하여 인자 값들에 미세 변화가 있을 경우 민감도는 어떻게 변화하는지 살펴 보았다. 수치해석 결과 adjoint 방법론은 적은 계산 시간에도 불구하고 기존의 반복 계산법에 비해 민감도를 잘 나타내는 경향을 보여 주었으나 수학적 제한으로 인하여 표준 편차가 큰 확률 밀도 함수로 표시되는 인자 값들에 대해서는 적용

이 불가능한 단점이 있다.

2. 본론

현재 개정 중인 과학기술부 관련 고시에 의거하면 이와 같은 처분장 성능 평가를 위해서 처분장 주변 천연 방벽 및 각종 공학적 방벽들의 불확실성을 감안하여 확률론적 성능 평가를 수행하도록 규정되어 있다. 현재 한국원자력연구소에서는 1차원적 확률론적 성능 평가를 위하여 MASCOT-K 코드[3]를 개발 사용 중에 있으며 다차원 지하 매질에서의 확률론적 성능 평가를 위해 CONNECTFLOW[4]를 개량하는 iConnect Club 국제 공동 연구를 수행할 예정이다. 법에 명시된 확률론적 방사선적 성능 평가를 위한 핵심 입력 자료인 지하수 유동 시간과 거리를 확률 밀도 함수로 표현하기 위한 방법론은 아래와 같다.

- 1) 기존의 결정론적 방법(deterministic approach)을 입력 인자 값들의 조합에 따라 반복 사용하여 구한다.
- 2) Adjoint 방법론과 같은 섭동(perturbation) 이론을 이용하여 제시된 기준 값 주변의 민감도를 평가한다
- 3) Monte Carlo, Latin Hyper Cubic, Modified Importance Sampling 과 같은 샘플링 기법으로 투수 계수 등의 불확실성을 고려하여 유동 경로 등을 평가한다.

본 논문에서는 Adjoint 방법론에 의한 확률론적 지하수 유동 평가를 수행하여 그 결과물들을 어떻게 활용하고 향후 개발되어야 할 방법론 개발 방향에 관하여 논해 보기로 한다.

Adjoint 방법론

Adjoint 방법론은 1계 perturbation 방법론으로 주어진 소폭의 시스템 인자 값의 변화에 대한 performance measure의 변화를 예측하는데 쓰인다. 유동 해석에서 performance measure는 아래와 같은 것들이 있다.

- 1) 처분장에서의 specific discharge
- 2) 처분장으로부터 지표면까지 지하수 유동 시간
- 3) 지하수두

Adjoint 민감도 방법은 스칼라 양인 performance measure의 시스템 인자에 대한 민감도 상수(sensitivity coefficient)를 결정하는 것이다. 민감도 상수는 performance measure의 인자(예를 들어 투수 계수)에 대한 1차 미분 형태로 나타난다. 이에 관한 수학적 정의는 다음과 같다. 우선 performance measure에 대한 정의는 아래와 같다.

$$J = \int_D f(\{\alpha\}, p) dD$$

여기서 함수 f 는 시스템 인자 α 와 지하수압의 함수이다.

또한 direct & marginal sensitivity는 아래와 같이 표시된다.

$$\frac{dJ}{da_k} = \int_D \left[\frac{\partial f(\{a\}, p)}{\partial a_k} - \frac{\partial \theta}{\partial x_i} \frac{\partial(\rho_j k_{ij}/\mu)}{\partial a_k} \frac{\partial p}{\partial x_j} \right] dD - \int_{\Gamma_1} \left[\theta^* \frac{\rho_j k_{ij}}{\mu} \frac{\partial \theta}{\partial x_i} n_j \right] d\Gamma_1 - \int_{\Gamma_2} \theta \frac{\partial \hat{q}}{\partial a_k} d\Gamma$$

여기서 우변의 첫째 항은 direct sensitivity를, 두 번째 항은 marginal sensitivity를 나타내며 3번째 항은 specified value 경계 조건에 관한 sensitivity를 네 번째 항은 flux 경계 조건에 관한 sensitivity를 나타낸다.

상기 sensitivity로부터 아래와 같이 normalized sensitivity가 수학적으로 정의된다.

$$S_k = \frac{dJ/J}{da_k/a_k} = \frac{d(\ln J)}{d(\ln a_k)} = \frac{d(\log J)}{d(\log a_k)}$$

수치 해석 결과

Adjoint Method의 경우 하나의 유동 경로에 약 30분 정도 소요되었고 1회에 마칠 수 있었다. 8개의 유동 경로에 대해 민감도를 조사하였으므로 240분 정도 소요되었으며 이는 기존의 반복법에 의한 소요 시간보다 적다고 할 수 있다.

그림 1은 처분장에서의 지하수 유동 경로를 평가한 결과를 도시한 것이다. 그림 2는 그림 1에서 구한 유동 경로 1에 대한 투수계수 변화에 대한 민감도를 분석한 것이다. 그림 2에서 노란 색과 빨간 색으로 표시된 영역은 영역 내 투수 계수의 증가에 따라 유동 시간이 감소하는 영역을 도시한 것이다. 위 내용들을 바탕으로 유동 경로 1에 대해 기존에 사용되고 있는 반복 계산법과 Adjoint Method에 의한 민감도 결과를 아래와 같이 비교해 보았다

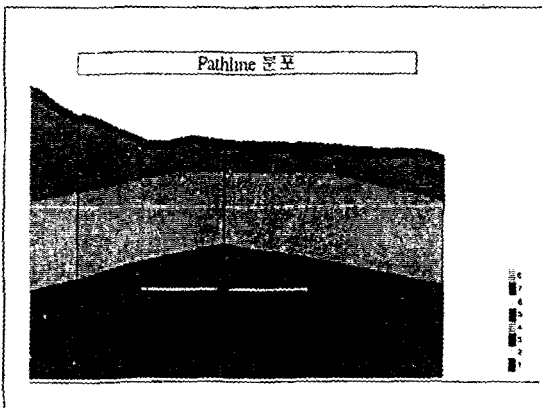


그림 1. 처분장 주변 유동 경로 계산 결과

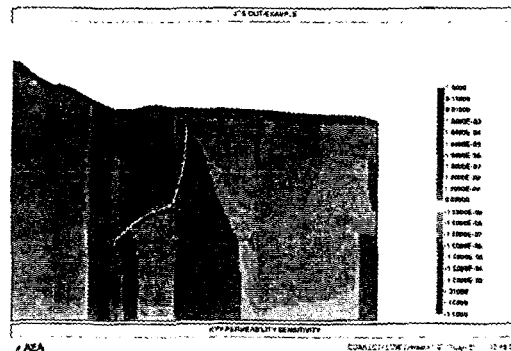


그림 2. 유동 경로 1에 대한 민감도.

3. 결론

기존의 반복법에 의한 유동 시간과 속도 결과 값과 Adjoint 방법론에 의한 결과는 기존의 반복법은 넓은 표준 편차를 가진 밀도 함수를 모사할 수는 있으나 계산 시간이 복잡하고 샘플링 결과가 확률 밀도 함수를 대표하는가 하는 문제가 제기 될 수 있고, Adjoint 방법론

은 섭동 이론의 한계상 넓은 표준 편차를 가지는 확률 밀도 함수를 대상으로는 사용될 수 없기에 서로 단순 비교될 수는 없다.

표 1. Connect flow에 의한 유동 시간 평가 결과 값

분 석 대 상	TRAVEL TIME(Y)	PATHLENGTH(M)
전 체	7.2404E+02	2.8698E+03

Adjoint 방법론의 경우 적은 양의 Sampling을 가지고 민감도 분석이 가능하고, 전산 수행 시간이 짧기 때문에 많은 시간을 단축시킬 수 있는 장점이 있으나 국부적인 민감도 분석만 가능하므로 한계를 지니고 있는 것이다. 따라서 이번 연구에서 향후 적은 양을 Sampling하면서도 전체적으로 정확한 분포를 반영하며 전산 수행 시간을 줄이는 새로운 코드 개발이 필요하다고 판단되는 바 이를 위해 2001년 새로운 다차원적 확률론적 다공 단열(fractured porous) 암반에서의 지하수 유동을 평가할 수 있는 코드 개발 국제 공동 연구가 추진될 예정이다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부에서 수행하는 “국가 중장기 원자력 연구 개발 사업”의 일환으로 추진되었습니다.

참고 문헌

1. USNCR “USNRC 10CFR60”, USNRC, 1987.
2. L.J. Hartley, “Adjoint Sensitivity Analysis of Steady State Groundwater Flow and Solute Transport”, EUR 17829, Nuclear Science and Technology, 1997.
3. 황 용수 외, “Development of the Overall Performance Assessment Code, MASCOT-K”, in preparation, Korea Atomic Energy Research Institute, 2001.
4. L.J. Hartley, “CONNECTFLOW Reference Guide”, AEAT, 1996.