

## One-Step Outflow Method를 이용한 불포화 수리전도도 측정

### The Measurement of Unsaturated Hydraulic Conductivity from One-Step Outflow Method

이수홍, 황주호

경희대학교

이재민

고려공업검사

김창락

한국수력원자력(주)원자력환경기술원

#### 요 약

방사성폐기물 처분장의 건설에 가장 중요한 부분 중의 하나는 처분안전성의 확보이다. 처분시스템의 기본적인 기능은 처분된 폐기물을 인간 환경으로부터 완벽하게 고립시켜 처분장 내에 영구적으로 격리시키는 것이다. 토양에서 수리전도도는 핵종의 이동과 밀접한 관련이 있다. 그러나 아직까지 국내에서 불포화 토양에 대한 수리 특성 연구는 많이 부족한 상황이다. 이에 본 연구에서는 빠르고 간단하게 불포화 수리 인자값을 산출하는 방법을 제시한다. 토양수분특성곡선과 수리전도도의 산출은 One-Step Outflow Method를 이용하였다.

#### Abstract

One of the most important parts in constructing radioactive waste repository may be its safety aspect. The fundamental function of the repository is to isolate completely and forever the radioactive wastes disposed of in it. However, since either normally or abnormally nuclides are to be released from the repository with a certain causes. The hydraulic conductivity is related to transportation of nuclide in soil. However, hydraulic characteristics research in unsaturated soil is not enough at present time. A fast and easy procedure for estimating unsaturated flow parameters is presented. The estimation is based on direct measurement of the retention characteristics combined with inverse estimation of the hydraulic conductivity characteristics from one-step outflow experiment.

#### 1. 서 론

방사성폐기물 처분장의 건설에 가장 중요한 부분 중의 하나는 처분안전성의 확보이다. 처분안전성을 평가하기 위해서는 처분부지에 대한 정확한 특성 평가가 필요하다. 국내외 처분시설 성능평가 관련 규정<sup>(1)(2)</sup>에는 불포화대의 해석을 요구하고 있으나 많은 연구에서 방사성폐기물 주변 토양을 포화상태로 가정하여 환경영향 평가를 수행하였다. 그러나 실제 토양은 지표에서 지하수대까지 불포화대로 구성되어 있다. 이에 국외의 경우 불포화대 특성 자료의 데이터베이스를 개발하여 활

용하는 상태이나<sup>(3)</sup> 현재 국내의 경우 포화대의 연구는 많이 수행된 반면 불포화대 연구는 미흡한 실정이다. 이에 따라 불포화대 매질 특성 실험을 통한 자료의 확보가 필요하다. 특히, 현재 방사성 폐기물 처분사업이 가시화됨에 따라 국내 환경에 맞는 자료 개발 및 국내 기술력 확보가 절실히 요구된다.

이에 따라 국내 특성에 맞는 대표적인 불포화대에서의 이동특성자료의 실험법을 정립하고 특성 실험을 통하여 불포화 매질 특성자료를 분석을 통해 확보할 필요가 있다.

현재 원자력환경기술원에서는 천층처분 실증시설을 건설하여 처분장 성능에 관한 실증 시험을 하고 있으며, 처분장의 불포화 매질에서 핵종 이동 특성에 관한 연구를 진행하고 있다. 본 연구에서는 처분장 실증 시설의 모래 매질을 사용하여 불포화 매질의 토양수분특성곡선 및 불포화 수리전도도 측정을 하고 국외의 관련 문헌값과 비교해 보고자 한다.

## 2. 본 론

### (1) 토양 특성 및 핵종 이동

지표아래의 모든 물을 통칭하여 지하수라 하며, 지표 위의 물을 지표수라 한다. 지하수는 2개의 지역에서 산출된다. 하나는 지표 바로 아래에서 지하수대까지의 부분으로 물과 공기를 포함하고 있으며 불포화대라고 한다. 불포화대 아래는 모든 공극이 물로 가득한 포화대가 있다.<sup>(4)</sup>

토양에서 핵종의 이동은 주로 물의 흐름과 밀접한 관계가 있는데 불포화 토양에서는 포화 토양에 비해 물의 흐름 속도가 늦고 이에 따라서 핵종의 이동 속도도 늦어지게 된다. 방사성 핵종의 이동을 나타내는 방정식은 식①과 같다.<sup>(10)</sup>

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{D}{Rd} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \frac{V}{Rd} \frac{\partial C}{\partial x} - \lambda C \quad \text{-----} \quad \text{①}$$

$C$  : 핵종의 농도,  $D$  : 분산계수,  $Rd$  : 지연인자,  
 $V$  : 지하수의 이동속도,  $\lambda$  : 핵종의 붕괴상수

지하수의 이동속도 외에도 토양에 대한 흡착성 등이 핵종 이동 속도와 연관성을 가지게 되나 토양은 항상 수분을 함유하고 있는 것을 고려했을 경우 물의 흐름이 토양에서 핵종의 이동 속도와 밀접하게 연관을 가질 수 있다.

처분 시설의 방사성폐기물 고화체로부터 침출되어 나온 방사성핵종은 처분시설 하부의 불포화대를 통과하여 지하수대에 도달, 지하수를 통하여 이동한다. 따라서 지하수대에 도달하기 전까지 불포화대에서 방사성 핵종의 이동 특성은 처분안전성 평가에 중요한 자료이며, 이는 불포화대에서 수리특성과 밀접한 관계가 있다.

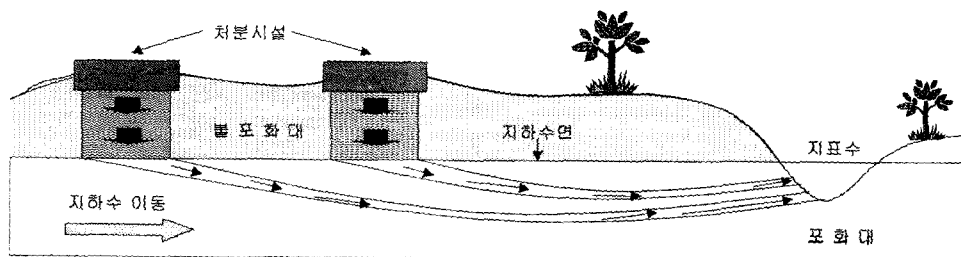


그림 1. 처분장 토양에서 핵종 이동 경로

### (2) 불포화 수리전도도 실험

Kool 등은(1985년) one-step outflow method을 위한 Richard 방정식의 수치해석을 통해 역해

기법을 처음으로 적용하였다. 그리고 Parker 등은(1985년) 네가지 종류의 토양에 대한 one-step outflow method 실험을 수행하였으며 포화도에 따른 토양의 수리전도도 함수와 토양수분 특성 곡선에 대한 평가를 하였다<sup>(5)</sup>.

본 실험에서 one-step outflow method를 이용한 불포화 수리전도도 실험장치의 구성은 다음 그림과 같다.

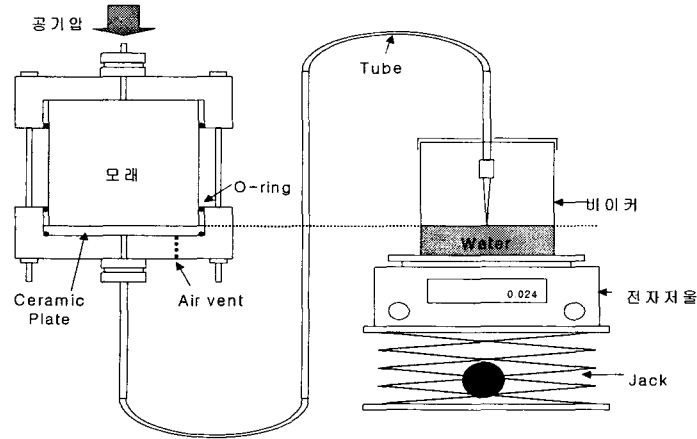


그림 2. 불포화 수리전도도 실험장비 구성도

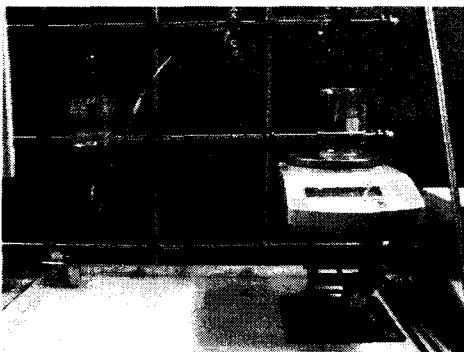


그림 3. 불포화 수리전도도 실험장치

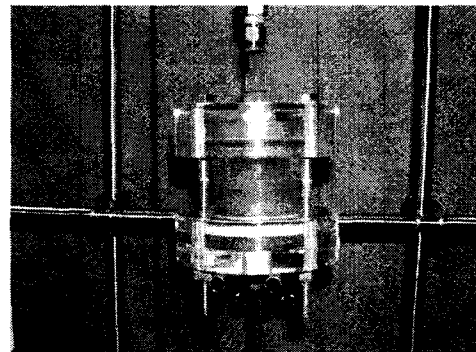


그림 4. 실험장치 중 컬럼

매질의 기본적인 특성값은 KS토질시험규격에 의거해서 산출하였으며, KS토질시험규격에 제시가 안 된 부분에서는 ASTM을 적용하였다. 본 실험의 매질로 사용된 모래의 기본 특성 및 기본 실험값은 다음 표1과 같다. 본 실험에 사용한 매질은 천층처분장 실증시설에 사용된 모래로서 현장 시료 실험 방법에 의거하여 #200번 체에 체질하여 얻은 것을 사용하였다<sup>(6)</sup>.

항목	모래	항목	모래
겉보기밀도 ( $g/cm^3$ )	1.571	실험전매질의무게 (g)	913.02
매질 부피 ( $cm^3$ )	64.935	실험후매질의무게 (g)	897.86
매질 높이 (cm)	4.083	실험 전 함수비	0.385
건조 무게 (g)	102.03	실험 후 함수비	0.151
압력 (kPa)	100		

표 1. 모래의 기본 토질 특성 및 실험값

포화수리전도도를 통하여 불포화 수리전도도 이론값을 산출하기 위한 식은 일반적으로 Mualem-van Genuchten model (MVG model)을 사용한다. 다음은 수리전도도를 구하기 위한 MVG Model 식이다. 식④는 포화수리전도도를 통하여 계산하는 불포화 수리전도도 식이며, 식②, ③은 함수량을 통하여 토양수분특성곡선을 구하는 식이다. 각 식에서 사용하고 있는 인자들은 실험에 의한 경험값이며,  $K_s$ 는 포화수리전도도이다<sup>(7)</sup>.

$$S_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r) \quad \text{-----} \text{②}$$

$$h(S_e) = [(S_e^{-1/m} - 1)^{1/n}] / \alpha \quad \text{-----} \text{③}$$

$$K(S_e) = K_s S_e^\lambda [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad \text{-----} \text{④}$$

$$m = 1 - 1/n$$

다음 그림 5의 “MVG Model”에서 제시한 모래의 토양수분 특성곡선이며, “실험 1”은 One-Step Outflow Method를 통하여 얻은 토양 특성값을 식 ③, ④에 적용하여 계산한 토양수분 특성곡선이다. “실험 2”는 suction 실험에 의해 구한 토양 수분 특성곡선이다. 토양수분곡선은 함수비에 따라 매질이 대기압 이하의 압력을 가지는 것을 나타낸 것으로 불포화 수리전도도를 계산하는데 있어 기본적으로 필요한 값을 제시한다.

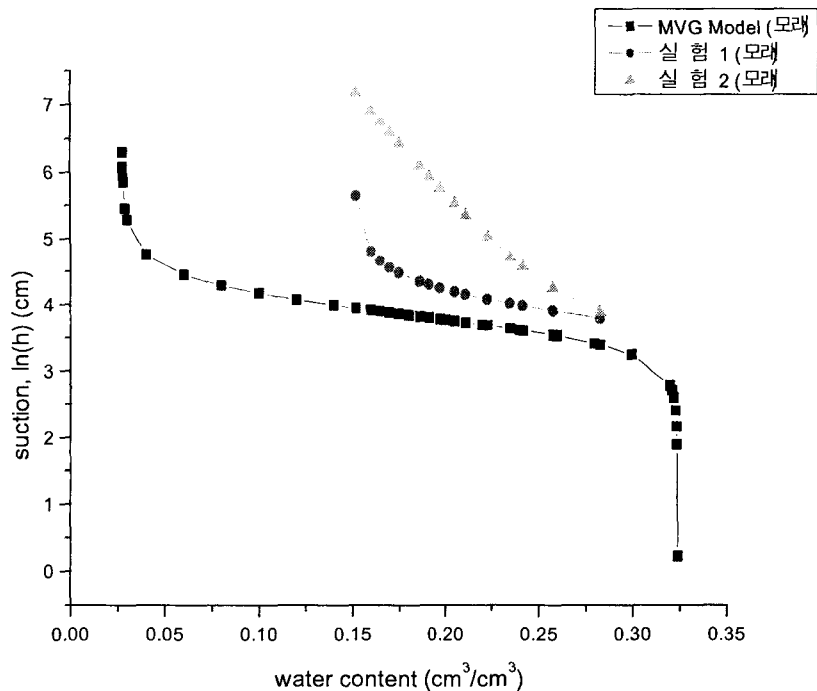


그림 5. 함수비에 따른 토양수분 특성곡선

그림 6은 MVG Model을 적용하여 포화수리전도도로부터 계산한 불포화 수리전도도와 실험을 통하여 얻은 실험값을 MVG Model에 적용(실험 1)하여 계산한 불포화 수리전도도, 그리고 One-Step Outflow Method의 결과를 suction 실험을 통하여 얻은 토양수분 특성곡선에 적용하여 불포화수리전도도(실험 2)를 계산한 그래프이다.

외국의 관련 연구<sup>(8)</sup>에서 토양특성에 따라 토양수분 특성곡선과 수리전도도 값이 큰 차이가 나타

내는 것을 보여주고 있다. 모래 매질의 경우 모래 입자의 크기나 입도에 따라서 결과값이 큰 차이를 나타낸다. 본 실험의 결과를 외국 문헌에서 제시하는 모래의 불포화 수리전도도와 비교하였을 때 결과값의 차이가 약간 나타나 이는 각 실험별로 사용하는 매질의 차이에 기인한 것으로 판단된다. 본 실험의 경우 천층처분 실증시설의 모래 매질을 사용하여 현장시험방법을 적용하였지만 외국 문헌의 경우 순수 모래만으로 실험을 하였다. 본 실험의 모래 매질은 현장 시료로 소량의 다른 토양이 섞여 있을 수 있으며, 이것이 토양수분 특성곡선과 수리전도도 측정에 있어서 오차를 만들어 냈다고 판단된다.

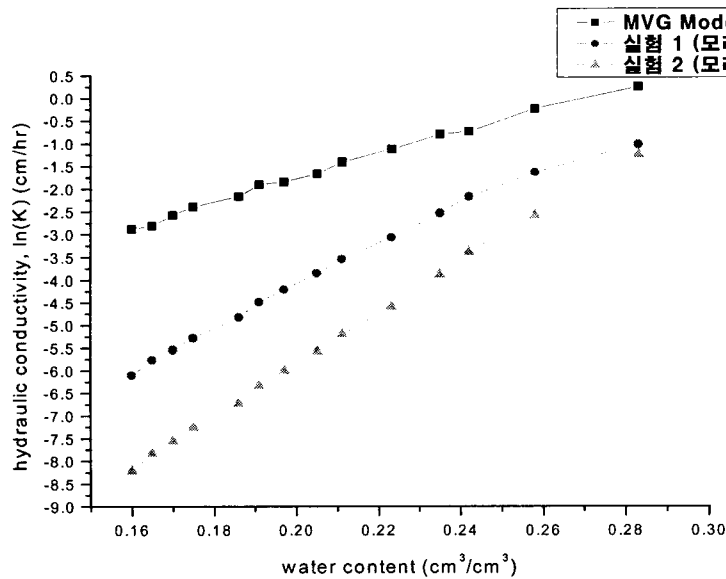


그림 6. 함수비에 따른 불포화 수리전도도

### 3. 결론 및 향후연구

본 실험에서는 불포화 매질에서의 수리전도도 측정을 위하여 One-step outflow method를 사용하였다. 이 방법은 가압된 공기를 통하여 인공적으로 불포화 조건을 만들 수 있어 기존 실험 방법에 비해 실험시간을 단축시키면서도 만족할만한 결과를 얻을 수 있다. MVG method과 실험값의 결과를 비교했을 때 보이는 차이는, 같은 모래라도 약간씩 매질의 특성이 다른 것에 기인한 것으로 판단된다. 수학적 모델링을 통한 실험식은 많은 불포화 수리 특성 연구를 통하여 만들었지만, 이는 실제 매질 실험을 통하여 얻은 값과 차이를 나타낸다. 특히, 같은 매질에서도 약간의 매질 특성 차이가 결과값에 큰 영향을 주기 때문에 수학적 모델링은 예측과 참고의 자료로 활용이 가능하나 정확한 데이터를 얻기에는 무리가 있다.

본 실험에서는 One-step outflow method를 적용하여 불포화 수리전도도를 측정하였으나 최근 들어 기존 방법의 단점을 보완한 Multi-step outflow method<sup>(9)</sup>가 많이 사용되고 있다. One-step outflow method는 실험초기에 매질 내의 물이 급격히 빠져나오는 경향이 크며 이는 실험의 전반적인 결과에 영향을 미치게 된다. 그러나 Multi-step outflow method는 그러한 단점을 보완하면서도 기존 실험 방법의 장점은 가지고 있다. 이에 추후 Multi-step outflow method를 본 실험에 적용하여 두 method 사이에서 결과값의 차이를 분석하고자 한다. 또한 반복된 많은 실험을 통하여 평균화된 적정값을 제시하고자 한다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 주관하는 2003년도 원자력연구개발 중장기 연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

1. "10 CFR 60. Disposal of high level radioactive waste in geologic repositories" , NRC, USA
2. "중·저준위 방사성폐기물 처분장 부지특성보고서 작성지침" 과학기술부 고시 제 94-4호
3. M.G. Schaap, P.J. Shouse, P.D. Meyer, "Laboratory Measurements of the Unsaturated Hydraulic Properties at the Vadose Zone Transport Field Study Site", 2003, PNNL-14284, DOE
4. Jan W.Hopmans, Graham E.Foqq "Soil Water Flow Under Saturated Conditions" University of California Davis
5. T.W.Green, Z.Paydar, H.P.Cresswell, R.J.Drinkwater, " Laboratory Outflow Technique for Measurement of Soil Water Diffusivity and Hydraulic Conductivity", 1998, CSIRO,AUSTRALIA
6. 이송, "(실용)토질시험법 및 해설", 2001, 청운문화사
7. J.C.van Dam, J.N.M.Stricker, Droogers, "Inverse Method for Determining Soil Hydraulic Functions from One-Step Outflow Experiments" ,1992, SOIL SCI.SOC.AM.J.,VOL.56
8. D.Wildenschild 외 5, "Unsaturated Hydraulic Parameters Combining Direct and Indirect Measurement. II . Hydraulic Conductivity", Technical University of Denmark
9. J.C.van Dam, J.N.M.Stricker, Droogers, "Inverse Method for Determining Soil Hydraulic Functions from Multi-Step Outflow Experiments" ,1992, SOIL SCI.SOC.AM.J.,VOL.56
10. 김필성, 황주호, "벤토나이트-모래 혼합 뒷채움재에서의 핵종 이동 민감도 분석" 경희대학교, '92추계원자력학회학술발표회논문집