

수치 모사를 이용한 정압주입시험

A Numerical evaluation of Constant Head Injection Test

박경우*, 김경수**, 고용권***

Kyung Woo PARK, Kyung Su KIM, Yong Kwon KOH

요 지

결정질 암반에서 지하수의 수리적 특성을 파악하기 위해 수행되고 있는 수리시험 방법은 정률법, 정압법, 순간주입(회복)법 등 세 가지로 구분할 수 있다. 본 연구에서 다루는 정압주입시험 (Constant Head Injection Test, CHIT)은 위의 정압법의 한 종류로 토목공학, 지질공학 분야에서 대상 구간의 투수계수 추정을 위해 널리 쓰이는 수리 시험이며, 이는 단일 패커나 이중패커를 이용하여 시험 구간을 격리하고, 격리된 구간에 일정한 압력으로 물을 주입하여 주입되는 물의 양을 파악함으로써, 시험 구간의 수리전도도 (Hydraulic conductivity)를 산출하는 전통적인 수리시험이다. 본 연구에서는 수치실험을 통해 시험 구간 및 주입 압력의 크기 등 인위적인 요인에 의해 도출되는 투수계수가 어떻게 달라지는지에 대해 평가해 보았다.

일반적으로 단열 암반에서 수행한 정압주입시험의 해석에 있어 매질을 균질, 등방성 다공질이라는 가정으로 구간별 투수량계수를 산출하기 때문에, 다공성 매질의 지하수 유동을 모사하는 MODFLOW를 수치모사 코드로서 이용하였다. 시험구간의 크기 및 주입압력에 대한 민감도 분석 결과, 시험구간의 크기에 상관없이 수치모의에서 입력한 수리전도도 값에 비해 낮은 수리전도도 값이 산출되었으며, 주입 압력이 클수록 산출되는 수리전도도 값이 매질의 수리전도도 값과 차이가 났다. 민감도 분석 결과 현장수리시험에서 정압주입시험에 의한 구간별 수리전도도 산출함에 있어 시험구간의 크기와 주입 압력 값에 대하여 고려해야 한다고 판단된다.

핵심용어 : 정압주입시험, 투수량계수, 수치모사

1. 서 론

정압주입시험은 기본적으로 주입공에서 매질로의 지하수의 정류 및 부정류상태의 흐름을 가정하여 지하수 유동에 대한 매질의 수리전도도를 해석하고 있다. 정류상태는 지하수 유동이 함수층에서 시간에 따라 변하지 않음을 의미한다. 그러나 실제로 정류상태는 자연 상태에서 좀처럼 발견할 수 없으며, 대수층에 변화를 준 후 일정한 시간이 경과하면 준정류 상태(quasi-steady-state condition)에는 도달할 수 있다. 많은 연구자들이 이러한 준정류 상태를 정류상태로 가정하여 지하수 유동을 해석하고 있는데, 이는 정류상태의 지하수 유동이 수학적으로 간단하며 지하수의 부정류 분석과도 비교적 잘 일치되고 있기 때문이다. Doe and Remer(1982)는 결정질 암반에서 지하수의 정류 및 부정류 상태 유동으로부터 계산된 수리전도도 값에 대해서 이론적으로 비교하였는데, 정류상태에서 산출된 수리전도도 값이 부정류 상태에 비해 다소 큰 값을 갖는다고 분석하였으며, 정류상태의 수리전도도 값이 부정류 상태의 수리전도도 값에 비해 오차 범위가 작고 정확하다고 했다. Andersson et al.(1985)은 스웨덴의 결정질 암반에서 수행한 다수의 단일공 수리시험을 바탕

#정회원, 한국원자력연구원 고준위폐기물처분연구부 선임연구원 · E-mail : woosbest@kaeri.re.kr

한국원자력연구원 고준위폐기물처분연구부 책임연구원 · E-mail : kskim@kaeri.re.kr

한국원자력연구원 고준위폐기물처분연구부 책임연구원 · E-mail : nykkoh@kaeri.re.kr

으로 정류상태와 부정류 상태에서 측정된 수리전도도 값을 비교하였으며, 정류상태에서 측정된 평균 수리전도도도 값이 부정류 상태에 비해 2.7배 크게 측정되었고, 때로는 10배에서 20배 큰 결과를 나타내기도 한다고 보고했다.

그러나, 기존연구들은 정압주입시험의 정류상태와 부정류상태에 대한 해석과 각각의 해석으로부터 산출되는 수리전도도 값의 비교 연구 및 정압주입시험의 특성에 대한 연구가 주로 이루어졌으며, 정압주입시험에서 변수로 작용되는 시험인자들에 대한 논의는 부족하였다. 최근에 들어서야 정압주입시험에서 시험구간의 크기를 달리했을 때, 그 결과로서 나타나는 유동차원의 변화에 대한 논의가 이루어지고 있다(Kuusela-Lahtinen, A., 2003). 일반적으로 단열 암반에서 수행한 정압주입시험의 해석에 있어 매질을 균질, 등방성 다공질이라는 가정으로 구간별 수리전도도를 산출하기 때문에, 다공성 매질의 지하수 유동을 모사하는 Visual Modflow를 사용하여 정압주입시험을 모의하였다. 정류 상태의 모의로 이중패커로 격리된 시험구간의 크기, 주입 압력과 매질의 수리전도도 등 정압주입시험의 시험인자에 대한 민감도 분석을 실시하여 매질의 수리전도도의 특성을 고찰해 보았다.

2. 이론적 배경

정류상태의 정압주입시험은 시추공에 이중 패커를 사용하여 시험구간을 격리 시키고, 격리된 구간에 일정 압력으로 물을 주입하면서 주입되는 물의 양이 일정한 값을 갖도록 충분한 시간이 경과된 후에 주입된 물의 양을 이용하여 시험구간의 수리전도도를 구하게 된다. 여기서 충분한 시간이 경과된 후라는 의미는 정류상태의 지하수 흐름을 유도하기 위해서이다. 정압주입시험을 해석할 때, 여러 가지 방법이 제시되었지만 정류상태의 해석에서는 일반적으로 Moya가 제시한 해석해를 사용하여 해석하게 된다. Moya의 해석해는 시험구간에서 매질로 유입되는 물의 흐름이 방사상유동에서 구상유동으로 변하는 경계를 가정함으로써 결과를 산출하게 하는데 된다. 방사상유동체계 (radial flow system)는 지하수의 2차원 유동으로 시험공과 근접된 영역에서만 형성되고 그 영역의 밖에는 3차원 유동체계인 구상유동체계 (spherical flow system)로 변하게 된다. Moya(1967)는 방사상흐름과 구상흐름의 경계가 $r = L/2$ 즉, 시험구간의 1/2 거리에 형성된다고 가정함으로써 다음과 같은 관계 함수를 유도하였으며, 이를 이용하여 매질의 수리전도도를 계산하게 된다.

3. 연구 방법

3.1. 수치모의

본 논문에서는 지하수 모델링 상용 프로그램인 Visual Modflow를 이용하여 정압주입시험을 수치적으로 모의함으로써 현장에서 수행하는 정압주입시험에서의 시험 인자들에 대한 영향을 분석해 보고자 한다. 흔히 현장에서 수행하는 정압주입시험은 이중 패커로 시험구간을 격리한 후 시험구간에 정압을 유지하면서 주입되는 유량을 시간별로 측정하여 유량변화를 이용하여 수리전도도를 구하는 방법과 일정시간이 경과된 후 주입되는 유량이 일정해지면 그 때의 유입량을 이용하여 매질의 수리전도도를 획득하는 방법으로 대별된다. 부정류 상태의 주입유량을 이용한 해석은 전술한 바와 같이 시험 구간의 투수성 구조의 기하학적 형태의 유추에 주로 사용되지만 해석과정이 지하수의 유동차원에 따라 조금씩 달라지기 때문에 유동차원에 대한 불확실성이 존재하게 된다. 따라서, 일반적으로 해석이 간편한 후자의 방법을 이용하여 매질의 수리전도도를 획득하고 있다. 본 모의에서는 일반적으로 현장에서 수행하는 정압주입시험을 수치모델링 기법을 이용하여 모사하였으며, 그 결과를 이용하여 시험조건에 대한 민감도 분석을 실시하였다.

3.2. 개념모델

수치 모의에 사용된 모형은 50m×50m×20m의 크기에 88×88×50개의 격자망으로 구성되어 있다 (Fig. 1). 중앙에 NX크기의 시추공을 모사하기 위해 0.076m×0.076m의 격자를 구성하였으며, 시추공에서 일정구간의 상하부 격자에 수리전도도 값을 작게 줌으로써 이중 패커를 모사하였다(Fig. 2). 초기 수두는 전 영역을 20m로 두어 포화상태로 만들었으며, 정압을 모의하기 위해 이중패커로 격리된 시험구간에 일정수두 경계 (constant head boundary condition)로 설정하였다. 또한, 시추공에서 매질로 유입되는 유량을 알기 위해

Modflow의 Zone budget module을 사용하여 시추공과 시추공에 인접한 매질을 각각 Zone 1과 Zone 2로 설정하였고 (Fig. 3), Zone 1에서 Zone 2로 유입되는 유량 (Q)을 구하였다. 격자망에서 시추공을 정방형으로 가정했기 때문에 구해진 유량 (Q)은 원형의 시추공에서 유입되는 유량 (Q')으로 변환시켰다(Fig. 3).

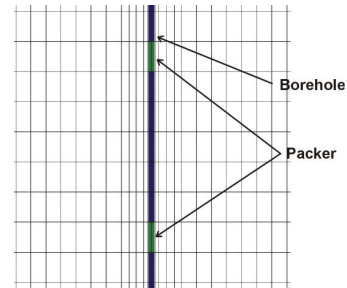
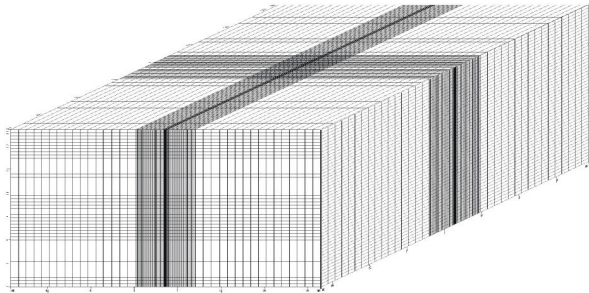


Fig. 1 The conceptual model and the finite difference grid used for numerical simulation

Fig. 2 Conceptualization of double packer and borehole

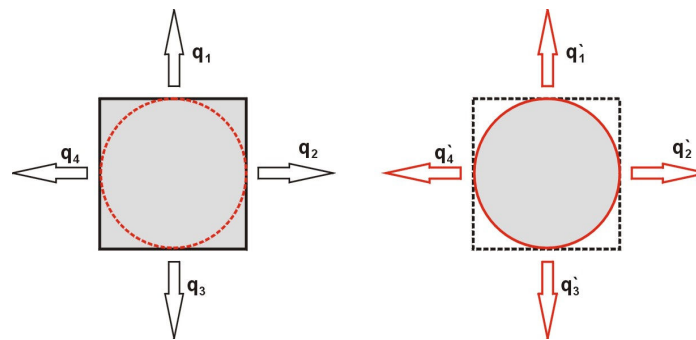


Fig. 3 Flow rate from borehole to matrix at cuboid and cylinder

수치모형의 상하좌우는 불투수 경계로 두었으며, 시추공의 일정수두 경계조건과 외곽의 불투수 경계에 미치는 영향을 없애기 위해 50m×50m의 넓은 영역을 주어 수치모의를 수행하였다. 수치모의는 하루 동안 부정류 상태에서 실시하였다. 수치모의에서 시추공 및 패커에 해당되는 격자의 입력조건은 Table 1과 같다. Andersson et al (2002)은 단열암반에서 지하수 유동에 대한 해석시 체계적인 접근방법의 하나로 지하수의 주유동로와 방벽역할을 하는 투수성 구조영역과 투수성 구조영역에 의해 구분되는 수리암반대영역, 토질층과 지표풍화과쇄대를 포함하는 수리토질대영역으로 구분하였다. 따라서, 매질의 수리전도도는 위에서 나누어지는 세 가지 영역을 모두 포함하는 범위의 모사를 수행하였으며, 시험 인자와 관련된 민감성 분석 모의에서는 투수성 구조영역과 수리암반대영역의 경계범위에 포함되는 1.0×10^{-7} m/s를 입력 조건으로 하여 아래와 같은 수치모의를 수행하였다.

Table 1. Input parameters of numerical simulations

	Hydraulic conductivity	Total porosity	Effective porosity	Specific storage	Specific yield
Borehole	1.0	0.999	0.999	0.5	0.999
Packer	1.0×10^{-12}	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-7}	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-7}
Matrix	variable	0.1	0.1	0.001	0.075

위에서 설명한 개념모델을 사용하여 정압주입시험의 정류 상태 모의를 수행하였다. 정상류 지하수 유동 모의는 Moya 해석해의 입력변수로 적용되는 시험인자를 변화시켜가면서 총 30회의 수치모의를 수행하였는데, 수치모의별 내용은 아래와 같다.

Case I : 시험구간의 크기 변화에 따른 수리전도도의 변화를 알아보기 위하여, 시험구간을 2m, 2.8m, 3.6m, 4.4m, 5.2m, 6.0m로 변화시켜 수치모의를 수행하여 산출되는 수리전도도 값 확인

Case II : 시험구간의 크기와 주입 압력의 변화에 따른 수리전도도의 변화를 알아보기 위하여, 시험구간을 2m, 3.6m, 5.2m로 일정하게 유지하고 주입 압력을 5m, 10m, 15m, 20m로 변화 시킨 후 수치모의를 수행하여 산출되는 수리전도도 값 확인

Case III : 매질의 수리전도도를 변화시켰을 때, 시험구간의 크기의 변화에 따른 산출되는 수리전도도 값을 알아보기 위하여, 시험구간의 크기를 2m, 3.6m, 5.2m로 일정하게 유지하고 매질의 수리전도도를 $1.0 \times 10^{-5} \sim 1.0 \times 10^{-8}$ m/sec으로 변화시킨 후 수치모의를 수행하여 산출되는 수리전도도 값 확인

4. 수치모의 결과

수치모의 결과 지하수의 정상류 모사에 대한 이론적 검증을 위해 모의 개념별 시추공에서 매질로 주입되는 유량을 도출하였다. 시추공의 시험구간이 커짐에 따라 시추공으로 주입되는 유량은 비례하여 커지는 양상을 관찰할 수 있으며 (Fig. 4(a)), 시추공의 시험구간에서 주입 압력이 커짐에 따라 또한 주입되는 유량도 시험구간의 크기별로 선형으로 증가하게 된다 (Fig. 4(b)). 또한, 매질의 수리전도도 값이 커짐에 따라 주입되는 물량은 지수적으로 커지게 된다 (Fig. 4(c)). 시험구간에서 매질로 주입되는 물량을 근거로 살펴봤을 때, 정압 주입시험의 수치모사 결과는 Darcy의 방정식을 잘 만족하고 있다.

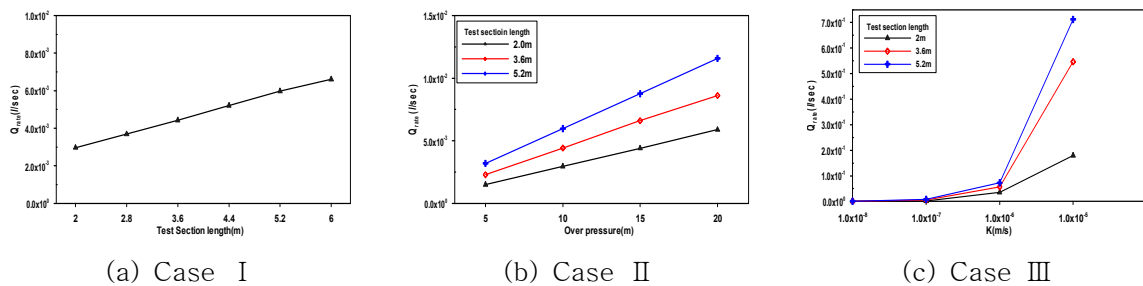


Fig. 4 Flow rate vs hydraulic parameters in relation to the Moye's equation.

위에서 설명한 개념 모델로 정상류 지하수 유동 모의를 통해 정압주입시험의 시험인자에 대한 민감도 분석을 실시하였다. 시험인자로서 수리전도도의 산출에 가장 큰 영향을 미치는 시험구간의 크기와 주입 압력에 대한 분석을 실시하였으며, 수치모의 결과 값의 신뢰도 확보를 위해 매질의 수리전도도 값을 변화시켰을 때, 각 수치모의에서 산출되는 수리전도도 값의 차이에 대한 분석을 실시하였다.

4.1. 시험구간의 크기에 의한 영향 (Case I)

주입공의 시험구간의 크기에 따라 산출되는 수리전도도 값의 차이를 확인하기 위해 시험구간을 변수로 두고 다른 조건들은 같게 하여 정류상태의 지하수 수치모의를 수행하였다. 매질의 수리전도도는 1×10^{-7} m/s이며, 주입 압력을 +10m로 일정하게 주었다. 수치모의 변수는 패커로 격리된 시험구간으로 2m, 2.8m, 3.6m, 4.4m, 5.2m, 6.0m의 크기를 변화시켜 시험공에서 매질로 주입되는 유량으로부터 매질의 수리전도도를 재계산하였다.

본 수치모의에서는 매질의 수리전도도를 일정하게 주고 모의를 수행하였기 때문에, 시험구간에 크게 상관없이 일정한 수리전도도 값이 산출될 것으로 예상된다. 그러나 전체적인 수치모의에서 입력값에 비해 낮은 값을 나타내었으며, 특이할 점은 시험구간별 산출된 수리전도도 값이 전체적으로 9.6×10^{-8} m/s 정도의 일정한 값을 갖는데, 매질에 입력한 수리전도도 (1×10^{-7} m/s) 값에 비해 4 % 정도 작은 값을 보이게 된다는 것이다(Fig. 5).

이렇게 입력치와 산출치가 다른 값을 갖는 이유는 다음 두 가지로 해석할 수 있다. 첫째는 수치모의에서 패커와 시추공에 대한 입력 값이 실제 시추공과 패커의 수리 인자를 반영하지 못해서 입력한 수리전도도와는 다른 값이 산출된다는 것이다. 두 번째는 Moye 해석해에서 구상유동과 방사상유동의 경계를 시험구간의 1/2로 가정하였기 때문에 나타나는 결과로 예상되며, 실제로 그 경계가 1/2보다 큼을 지시한다.

현장조사에서 정압주입시험을 실시할 때, 패커는 불투수성이므로 수치모의에서 입력한 수리인자에 비해 작은 값을 가지며, 시추공은 큰 값을 가질 수 있다. 그러나, 수치모의의 적용된 수리인자(Table 1)을 고려했을 때, 첫 번째 설명은 크게 설득력이 없다. 두 번째 해석에서 실제로 모의 결과를 이용하여 균질·등방성 매질의 Moya 해석에서 구상 유동과 방사상유동의 경계를 시험구간 크기의 6/10으로 주었을 때, 입력된 수리전도도에 근접한 값을 구할 수가 있어, 지하수유동의 경계에 대한 심도있는 고찰이 요구된다. 또한, 정압주입시험시 시험구간에 따라 수리전도도 값이 다르게 도출될 수 있으므로 주의가 요구된다.

4.2. 주입 압력에 의한 영향 (Case II)

주입공의 시험구간별 주입 압력에 의해 산출되는 수리전도도 값의 차이를 확인하기 위해 시험구간과 주입 압력을 변수로 두고 다른 조건들은 같게 하여 정류 모의를 수행하였다. 매질의 수리전도도는 1×10^{-7} m/s로 일정하게 주었다. 수치모의 변수는 패커로 격리된 시험구간과 주입 압력으로 시험구간은 2m, 3.6m, 5.2m의 크기, 주입 압력은 +5, +10, +15, +20m로 변화시켜 시험공에서 매질로 유입되는 유량으로부터 매질의 수리전도도를 재계산하였다(Fig. 6).

수치모의 결과로부터 시험구간의 크기에 따라 산출되는 수리전도도는 2m의 시험구간을 제외하면 대략 일정한 값을 갖게 됨을 알 수 있었는데, 주입 압력에 대한 고려는 하지 않았다. 본 모의에서 주입 압력과 시험구간의 크기를 변화시켜 모의를 수행하였으며, 그 결과 2.0m의 시험구간에서 산출되는 수리전도도는 주입 압력에 따라 크게 변하지 않았으나, 3.6m, 5.2m의 시험구간에서 산출되는 수리전도도는 주입압력이 커짐에 따라 서서히 감소하였다. 특히 주입 압력을 +20m 두어 수치모의를 수행한 결과 매질에 입력한 수리전도도 값(1×10^{-7} m/s)과 가장 큰 차이를 내는 값이 산출됨을 알 수 있었다. 즉, 정압주입시험으로 매질의 수리전도도 및 투수량계수를 산출할 때, 시험구간 뿐만 아니라 주입 압력에 의해서도 산출되는 수리전도도 값이 변할 수 있으므로 이들을 함께 고려하여 시험을 실시하는 것이 바람직하다고 판단된다.

4.3. 시험구간의 크기별 매질의 수리전도도 값의 변화 (Case III)

모의 I 과 모의 II에서는 매질의 수리전도도를 일정하게 주어 모의를 수행하였다. 본 수치모의는 매질의 수리전도도 입력 값에 따라 산출되는 수리전도도의 신뢰성 확보를 목적으로 실시하였다. 매질의 수리전도도를 변화시켰을 때, 시험구간 크기의 변화에 따른 산출되는 수리전도도 값을 알아보기 위하여, 시험구간의 크기를 2m, 3.6m, 5.2m로 일정하게 유지하고 매질의 수리전도도를 $1.0 \times 10^{-5} \sim 1.0 \times 10^{-8}$ m/sec으로 변화시킨 후 수치모의를 수행하여 산출되는 수리전도도 값을 확인하였다.

Fig. 7은 매질에 입력된 수리전도도 값에 따라 산출되는 수리전도도 값을 나타낸 그래프이다. 2m의 시험구간에서는 입력되는 수리전도도에 비해 산출되는 수리전도도 값이 작은 값을 보이고, 3.6m와 5.2m에서는 거의 유사한 값을 보인다. 하지만 전체적으로 입력 값과 산출 값이 선형적인 관계를 보이고 있고, 값에서도 큰 차이를 보이지 않아 수치모의에서 입력되는 수리전도도가 다른 값을 가질 때도 산출되는 수리전도도 값을 신뢰할 수 있다고 판단된다.

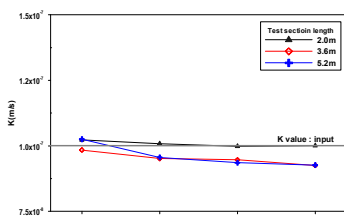


Fig. 5 Variations of hydraulic conductivity in relation to overpressure at each test section length simulations

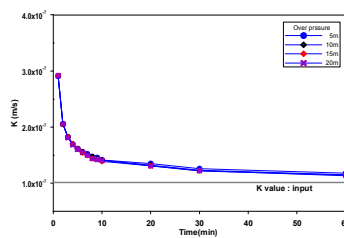


Fig. 6. Variations of the hydraulic conductivity during transient numerical

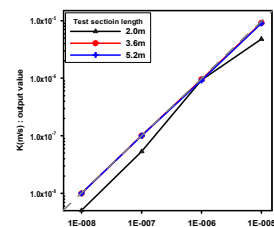


Fig. 7 Variations of hydraulic conductivity in relation to input hydraulic conductivity

5. 결론

Visual Modflow 수치 코드를 이용하여 정압주입시험의 수치모의를 수행하였다. 수치모의를 통해 정압주

입시험에서 산출되는 수리전도도 값을 구하였으며, 정압주입시험에서 입력되는 인자를 변화시켜가며 정류 유동 수치모의를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다. 주입공에서의 반경이 시험 구간(2m)을 초과한 영역의 관측공에서는 시험구간 근처의 관측공에 비해 지하수두 변화가 극히 적은 것으로 나타났다. 이는 정압주입시험으로 산출한 수리전도도 값이 단공시험에 불과하므로, 수직적으로 구간별 수리전도도를 구하는데에는 용이하나, 수평적으로 확장하여 층별 수리전도도를 적용하는 것은 많은 불확실성을 가질 수 있음을 지시한다. 지하수의 정류상태의 흐름을 가정하여 정압주입시험의 시험인자에 대한 민감도 분석을 실시하였다. 시험구간의 크기에 따른 산출되는 수리전도도 값은 전체적으로 9.6×10^{-8} m/s 정도의 일정한 값을 갖는데, 매질에 입력한 수리전도도 (1×10^{-7} m/s) 값에 비해 4 % 정도 작은 값을 보이게 된다는 것이다. 이는 Moya 해석해에서 구상 유동과 방사상 유동의 경계를 시험 구간의 1/2로 가정하였기 때문에 나타나는 결과로 예상되며, 실제로 그 경계가 1/2보다 큼을 지시한다. 실제로 모의 결과를 이용하여 균질·등방성 매질의 Moya 해석해에서 구상 유동과 방사상 유동의 경계를 시험구간 크기의 6/10으로 주었을 때, 입력된 수리전도도에 근접한 값을 구할 수가 있어, 지하수유동의 경계에 대한 심도있는 고찰이 요구된다. 주입 압력의 변화에 의해 산출되는 수리전도도 값의 차이를 확인한 결과 시험구간의 크기 뿐만 아니라 주입 압력에 의해서도 산출되는 수리전도도 값이 변할 수 있으므로 이들을 함께 고려하여 시험을 실시하는 것이 바람직하다고 판단된다.

6. 참고문헌

- Andersson, P. and Klockars, C-E., 1985, Evaluation of single-hole hydraulic tests in fractured crystalline rock by steady-state and transient methods. SKB Technical Report TR 85-19.
- Doe, T, and Remer, J., 1982, Analysis of Constant-head well tests in Nonporous Fractured Rock, Proceedings of the 3rd International Well-testing Symposium, Berkeley, California.
- Kuusela-Lahtinen, A., Niemi, A. and Luukkonen, A., 2003, Flow dimension as an indicator of hydraulic behavior in site characterization of fractured rock, Ground water, Vol. 41, No. 3, pp. 333-341
- Moya, D. G., 1967, Diamond drilling for foundation exploration, Civil Eng. Trans., Institution of Eng., Australia, Vol. CE9, No.1, pp. 95-100

감사의 글

본 연구는 교육과학부 원자력연구개발 중장기계획사업과제의 지원을 받았음을 밝히며 이에 감사드린다.