

암반대수층 내 순간충격시험 시 관찰된 요동반응의 해석

류일호¹⁾, 지성훈^{1)*}, 고용권¹⁾

Analysis of oscillatory responses of slug tests in a crystalline rock aquifer

I. Ryu, S.-H. Ji, Y. Koh

Abstract Slug test is a common characterization method that estimates aquifer hydraulic conductivity rapidly and economically. To characterize the hydraulic property near the borehole YS-4 in the Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI) site, slug tests were performed, and oscillatory hydraulic responses were observed. We analyzed the observations with the modified Hvorslev and Bouwer&Rice methods considering the casing inertia, and then the results were compared with those from the general Hvorslev and Bouwer&Rice methods. The estimated hydraulic conductivities from the modified methods are ranged from 4.85×10^{-6} to 5.44×10^{-6} m/sec, but those from the general ones are ranged from 3.10×10^{-6} to 3.63×10^{-5} m/s, which shows that the oscillatory responses should be analyzed with consideration of the flowing water inertia effect.

Key words slug test, oscillatory hydraulic responses, inertia effect, fractured rock

초 록 순간충격시험은 대수층의 수리특성을 빠르고 효과적으로 측정할 수 있는 가장 일반적인 방법이다. 한국원자력연구원(KAERI) 부지 내 YS-4 시추공에서 부지의 수리특성을 알아보기 위하여 순간충격시험을 수행하였고, 그 결과 일반적인 수리반응과 다른 요동수리반응을 관찰하였다. 이 반응결과를 일반적인 해석방법과 시추공 내 유체의 관성 영향을 고려한 해석방법으로 해석하여 각각 비교하였다. 그 결과 일반적인 해석 방법으로는 수리전도도가 $3.10 \times 10^{-6} \sim 3.63 \times 10^{-5}$ m/sec로 예측되어 해석결과가 차이가 크게 나타났지만, 유체의 관성효과를 고려하였을 때는 $4.85 \times 10^{-6} \sim 5.44 \times 10^{-6}$ m/sec로 그 해석결과가 거의 비슷하였다. 이는 순간충격시험 시 요동수리반응은 반드시 공내 유체의 관성 효과를 고려하여 해석하여야 함을 보여준다.

핵심어 순간충격시험, 요동수리반응, 관성 효과, 단열 압반

1. 서 론

대수층을 구성하고 있는 지질매체의 수리특성은 관정에서의 수리시험을 통해 특성화할 수 있다. 일반적으로 많이 수행되는 수리시험으로 양수시험(pumping test)과 순간충격시험(slug test)이 있는데, 현장상황에 따라 적절한 시험의 종류를 선택하고 이를 적합한 방법으로 수행하여야 효율적으로 자료를 얻을 수 있다. 특별히 매질의 투수성이 매우 낮은 암반대수층의 경우, 양수량을 일정하게 유지시키기가 어려워 양수시험보다는 순간충격시험이 선호된다.

순간충격시험은 일정 부피의 물체(더미, 물 등)를 관정에 주입 또는 제거하여 순간적인 수위 변화(initial displacement)를 유발한 후 시간에 따른 지하수위 변화를 측정함으로써 지질매체의 수리상수를 추정하는 현장 시험법으로, 이를 통해 관정 주변의 수리전도도나 저류계수 등의 수리특성을 알아낼 수 있다. 순간충격시험은 1개의 관정을 이용하기 때문에 경제적이고 효율적이며, 오염지역에서 대수층의 수리상수를 추정하고자 할 때 오염을 더욱 가속화시킬 우려가 있는 양수시험보다 선호된다. 그러나 시험을 통해 도출되는 수리상수가 양수시험으로부터 도출된 것보다 작은 규모의 영역을 대표한다.

순간충격시험의 결과를 분석하기 위해 다양한 해석해들이 제안되었다. Hvorslev (1951)은 피압대수층에 설치된 완전관통관정(fully penetrated well)이나 부분관통관정(partially penetrated well)에서의 순간충격시험 시

¹⁾ 한국원자력연구원 방사성폐기물기술개발부

* 교신저자 : shji@kaeri.re.kr

접수일 : 2009년 8월 7일

심사 완료일 : 2009년 8월 27일

게재 확정일 : 2009년 8월 27일

수리반응에 대한 해석해를 유도하여 수리전도도를 추정하는 방법을 제안하였으며, Cooper et al. (1967)은 대수층의 압축률을 고려하여 피압대수층에 설치된 완전관통관정에서의 순간충격시험에 대한 수리반응을 묘사하는 해석해를 유도하였고 이를 이용해 수리전도도와 저류계수를 추정하는 방법을 제안하였다. 그리고 Bouwer and Rice (1976)은 자유면대수층에 설치된 완전관통관정 혹은 부분관통관정에서의 수행된 순간충격시험 시 수리반응에 대한 해석해를 유도하여 대수층의 수리전도도를 추정하는 방법을 제시하였다. 그 외 많은 연구자들이 다양한 대수층의 형태와 관정 구조를 가정하고 위 세 가지 해석해를 확장하여 순간충격시험의 수리반응에 대한 해석해를 제안하였다(e.g. Neuzil 1982, Zlotnik 1994, Belitz et al. 1995). 하지만, 실제 순간충격시험 시 대수층의 형태와 그 수리특성에 대한 불확실성이 크므로 보통 Hvorslev (1951), Cooper et al. (1967), Bouwer and Rice (1976)의 해석해가 수리반응 해석에 많이 사용되고 있으며, 특별히 비교적 투수성이 높은 대수층에 대해서는 수리전도도의 높은 변이성을 고려하여 Hvorslev (1951)과 Bouwer and Rice (1976)의 해석해를 주로 사용한다 (Zlotnik and McGuire, 1998a).

연구지역인 한국원자력연구원(KAERI) 부지 내의 YS-4 시추공에서 부지의 수리특성을 파악하기 위해 순간충격시험을 시행하였다. 시험 결과 일반적인 형태의 결과와는 달리 진동하는 형태로 수위가 회복되는 것으로 나타났다. 본 저자들이 조사한 바에 의하면 국내에서는 순

간충격시험 시 이러한 수리반응이 보고된 바 없지만, 국외에서는 투수성이 매우 커 지하수속도가 1 m/s의 차수를 보이는 모래/자갈의 퇴적층이나 사암 또는 현무암으로 구성된 대수층에서 관찰된 바 있다(e.g. van der Kamp 1976, Springer and Gelhar 1991, Zlotnik and McGuire 1998b, Butler et al. 2003). 이들에 의하면, 투수도가 매우 큰 대수층에서는 순간충격시험 시 관정 내 유입된 지하수의 속도가 매우 빨라서, 관정의 스크린 반경과 케이싱 반경이 차이가 날 때 그 연결부위에서 지하수 흐름의 관성 효과가 무시할 수 없을 만큼 커지기 때문에 요동수리반응이 발생하는 것으로 설명하고 있다. 이에 본 연구에서는 연구 지역에서 관찰된 요동수리반응을 기존의 순간충격시험 해석법과 관정 내 지하수의 관성 효과를 고려한 해석법으로 해석하여 비교해보고자 한다. 그리고 국외에서 투수성이 매우 큰 대수층에서 관찰된 요동수리반응이 상대적으로 투수성이 낮은 단일암반 대수층에서 관찰된 원인에 대해 논의해보고자 한다.

2. 순간충격시험

연구지역은 한국원자력연구원 부지로, 중생대 화강암으로 구성되어 있다(Fig. 1). 연구지역 내에는 부지의 수리지질특성을 조사하기 위한 관정들이 위치하고 있으며 이 중 직경 76 mm의 관정인 YS-4에서 순간충격시험을 수행하였다. YS-4 관정의 제원은 Table 1에 정리하였다.

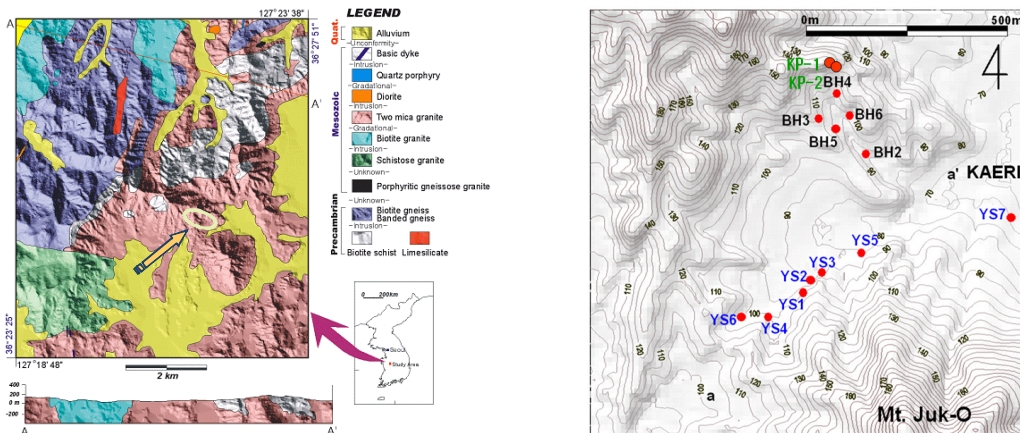


Fig. 1. Geologic map and well field of the study area.

Table 1. Detail of Test well.

Well	Elevation (m)	Total depth (m)	Screen diameter (mm)	Casing diameter (mm)
YS-4	91	350	44	26

YS-4 관정에는 Westbay 사의 Multi Packer System 이 설치되어 있으며, 순간충격시험 시 수리요동반응은 심도 246 - 264 m 구간에서 관찰되었다.

YS-4 관정은 지하수위가 지표 위에 존재하는 자분정으로, 시험구간인 심도 246 - 264 m 구간의 안정수위는 지표보다 약 3.8 m 높다. 이에 본 연구에서는 수위가 지표 아래에 위치하는 일반적인 경우와는 다른 방법으로 다음과 같이 순간충격시험을 수행하였다. Fig. 2는 순간충격시험에 이용된 장치를 보여준다. 그림과 같이 안정수위가 아크릴관 내에 위치하도록 투명 아크릴관을 관정 상부와 연결하고 아크릴관 하부에 자동수위측정

정기를 설치한다. 지하수위가 안정되면 아크릴관과 관정 상부와의 연결부위에 위치한 밸브를 닫아 아크릴관과 관정을 수리적으로 단절시키고, 아크릴관 하부의 밸브를 이용하여 아크릴관 내부에 있는 일정 부피의 물을 빼낸다. 그리고 아크릴관과 관정 상부의 연결부위에 위치한 밸브를 열어 아크릴관과 관정을 수리적으로 연결시켜 대수층에 순간적인 수리충격을 가하고 이에 대한 지하수위반응을 관찰한다. 시험 구간에서 관찰한 수리반응은 Fig. 3과 같다. 참고로 본 순간충격시험은 동일한 수리충격(initial displacement)에 대해 2~3회 반복 시험하였다.

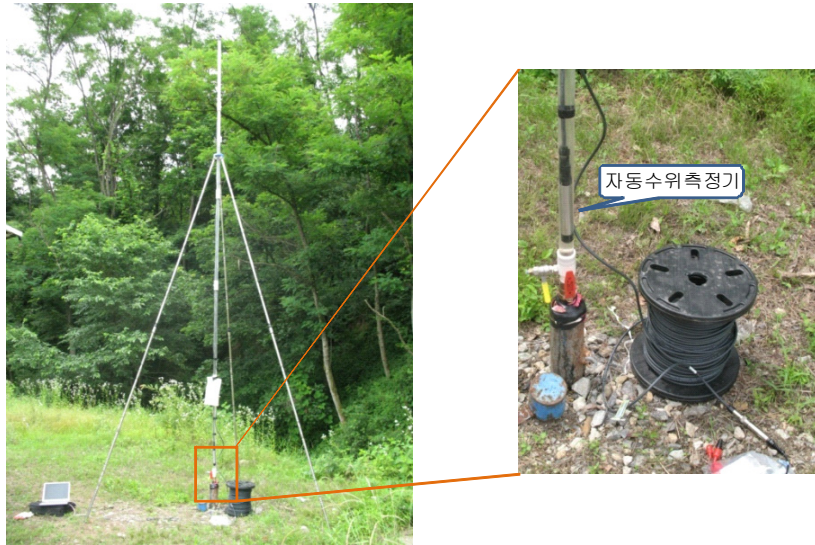


Fig. 2. Image of the test equipment.

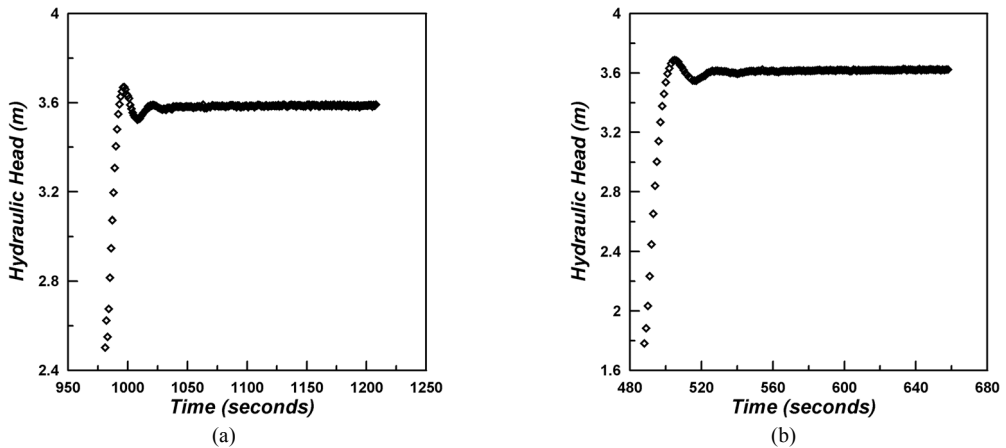


Fig. 3. Observed hydraulic responses for the slug tests at 246 - 264 m depth in YS-4 with the initial displacements of: (a) 1.09 m; and (b) 1.85 m.

3. 결과 및 토의

먼저 관찰된 수리반응을 기존의 Hvorslev (1951)과 Bouwer and Rice (1976)의 해석해를 이용해 해석하였다(Fig. 4). 이때, H/H_0 는 초기에 가한 수위 변화(initial displacement, H_0)와 시간에 따른 수위변화(H)의 비이다. 수위가 요동하는 시험 후기의 수리반응은 무시하고 시험 초기의 수리반응을 각 해석해의 type curve와 맞추었다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 수리반응의 어느 부분에 type curve를 맞추느냐에 따라 추정하는 수리전도도가 달라질 수 있으며 이에 추정할 수 있는 수리전도도의 최대값과 최소값을 구해 추정할 수 있는 수리전도도의 범위를 산정하였다. Table 2은 각 해석해를 이용해

추정한 수리전도도의 범위를 보여준다. 표에서 확인할 수 있듯이 해석법에 따른 추정값의 차이는 거의 없다. 하지만 이 해석법들을 통해 추정가능한 수리전도도의 범위는 $3.10 \times 10^{-6} \sim 3.63 \times 10^{-5}$ m/s으로 1차수 이상 차이가 나는 등 추정값의 불확실성이 매우 커 기존 해석법을 유도하기 위한 가정과 관찰한 수리반응의 실험 조건이 다르다는 것을 보여준다.

요동수리반응을 고려하기 위해 관정 내 관성효과를 고려한 해석해를 이용하여 관찰한 수리반응을 해석하였다. 해석에 사용한 해는 Butler et al. (2003)이 제안한 해석해이다. Butler et al. (2003)은 관정 내 관성효과를 고려하기 위해 운동량 보존 법칙을 이용하여 다음의 운동량 보존 방정식을 유도하였다.

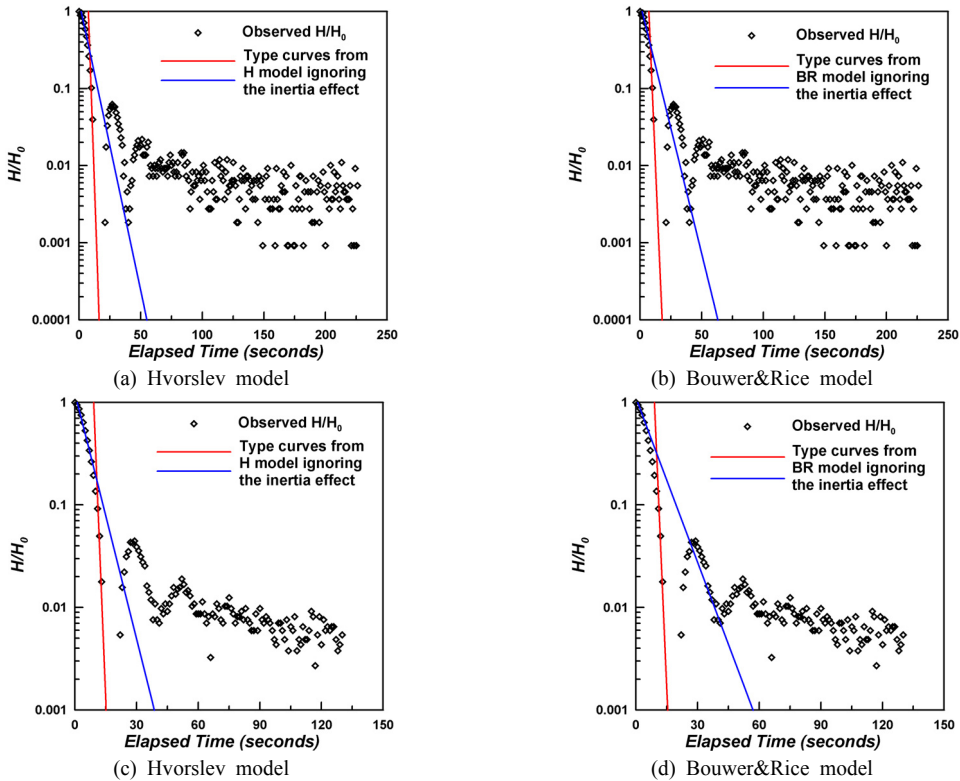


Fig. 4. Type curve matching of the slug test results with the initial displacements of: (a-b) 1.09 m; and (c-d) 1.85 m using Hvorslev and Bouwer&Rice models ignoring the inertia effect in a well.

Table 2. Estimated hydraulic conductivities using Hvorslev and Bouwer&Rice models ignoring the inertia effect in a well.

Initial displacement (H_0)	1.09 m		1.85 m	
	Hvorslev	Bouwer&Rice	Hvorslev	Bouwer&Rice
Min. estimated K [m/s]	4.60×10^{-6}	3.10×10^{-6}	4.90×10^{-6}	3.31×10^{-6}
Max. estimated K [m/s]	3.05×10^{-5}	3.02×10^{-5}	3.33×10^{-5}	3.63×10^{-5}

$$\frac{(L_e + w)}{g} \frac{d^2w}{dt^2} + \frac{A}{g} \left(\frac{dw}{dt} \right)^2 + \frac{F}{g} \frac{dw}{dt} + w = h$$

단, L_e 는 물기둥의 유효길이 [L], w 는 관정 내 안정수 위로부터의 수위 변이 [L], g 는 중력가속도 [L/T^2], A 는 비선형계수 [dimensionless], F 는 점성 손실 계수 [L/T], h 는 대수층 내 안정수위로부터의 수위 변이 [L]이다. 그리고 위 방정식을 Hvorslev (1951)와 Bouwer and Rice (1976)가 해석해를 유도하기 위해 사용한 지배방정식, 경계조건 등과 결합하여 함께 풀어 2개의 해석해를 유도하였다. 이를 각각 수정 Hvorslev 모델, 수정 Bouwer & Rice 모델이라 명명한다. Fig. 5는 수정한 해석해의 type curve와 관찰한 요동수리반응을 맞춘 것이다. 시험 초기 수리반응과 첫 번째 요동은 type curve와 관찰한 수리반응이 일치한다. 하지만 type curve는 첫 번째 요동 이후 요동이 없지만 시험 자료에는 지속적인 요동이 관찰된다. 관찰한 수리반응과 맞춘 type curve를 이용하여 추정된 시험 구간의 수리전도도는 $4.85 \times 10^{-6} \sim 5.44 \times 10^{-6}$ m/s의 값을 보여준다(Table 3). 해석 모델에 따른 추정값의 차이는 거의 없으며, 기존 해석 방법을 적용한 경우와 달리 type curve가 관찰한 수리반응과

비교적 잘 맞춰져 추정값의 불확실성도 매우 낮다.

선행 연구들에 의하면(e.g. Zlotnik and McGuire, 1998; Zurbuchen et al., 2002; Butler et al., 2003; Ostendorf et al., 2005), 순간충격시험 시 요동수리반응은 모두 수리전도도가 $5 \times 10^{-4} \sim 7 \times 10^{-3}$ m/sec로 투수성이 매우 큰 대수층에서 관찰되었다. 하지만 본 시험 구간의 수리전도도는, 관정 내 관성효과를 고려한 해석법으로 유추했을 때, 약 5×10^{-6} m/sec로 선행 연구 대상의 대수층들에 비해 2~3차수 정도 낮다. 참고로 저자들이 조사한 바로는 이와 비슷한 수리전도도를 갖는 국내 대수층에서 요동수리반응이 관찰된 예는 없다. 관찰된 요동수리반응의 원인으로 시험 구간이 단일 밀도가 매우 낮은 화강암반 대수층인 것을 생각해볼 수 있다. 요동수리반응이 관정 내 지하수의 관성효과로 인해 발생한 것이라고 가정한다면, 이는 궁극적으로 대수층의 수리전도도보다는 빠른 지하수 속도에서 기인한 것이다. 관정 주변의 지하수 속도는 다음 식과 같이 주어진다.

$$v = \frac{q}{n_e} = \frac{K}{n_e} \frac{\partial s}{\partial r} \Big|_{r=r_w}$$

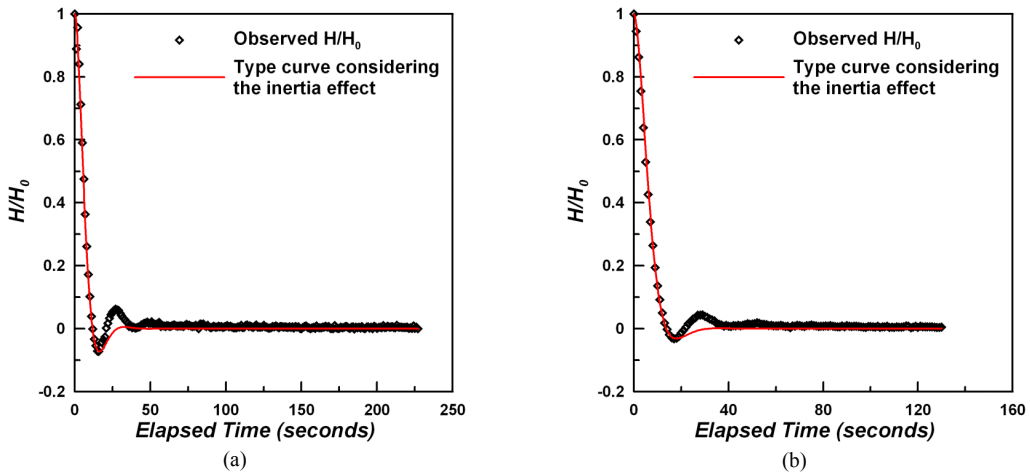


Fig. 5. Type curve matching of the slug test results with the initial displacements of: (a) 1.09 m; and (b) 1.85 m using the modified Hvorslev and Bouwer&Rice models considering the inertia effect in a well.

Table 3. Estimated hydraulic conductivities using the modified Hvorslev and Bouwer&Rice models considering the inertia effect in a well.

Initial displacement (H_0)	1.09 m		1.85 m	
Model	Modified Hvorslev	Modified Bouwer&Rice	Modified Hvorslev	Modified Bouwer&Rice
Estimated K [m/s]	5.38×10^{-6}	5.44×10^{-6}	4.85×10^{-6}	4.90×10^{-6}

단, q 는 지하수유속 [L/T], n_c 는 유효공극률 [dimensionless], K 는 수리전도도 [L/T], $\left. \frac{\partial s}{\partial r} \right|_{r=r_w}$ 는 관정 주변에서의 수두구배 [dimensionless]이다. 연구 지역에서 기수행된 수리시험결과에 의하면 연구 지역 내 화강암 반 매질의 수리전도도는 약 5×10^{-8} m/sec으로 낮아 지하수가 유동성 단열을 통해서만 흐른다고 가정할 수 있으며, 이에 유효공극률은 전체 시험구간의 길이와 시험구간 내 유동성 단열의 총 간극의 비로 주어진다. YS-4 관정에서 수행된 공내음파촬영 결과에 의하면, 시험 구간에는 유동성 단열로 보이는 개구성 단열이 1개 존재하며, 이에 따라 유동성 단열의 간극을 100~500 μ m라 가정하면 유효공극률은 $6 \times 10^{-6} \sim 3 \times 10^{-5}$ 의 값을 갖는다. 순간충격시험 시 관정 주변의 수두구배는 순간적으로 1 이상이 될 수 있으므로, 관정 주변 지하수 속도는 시험 시 1 m/sec 이상이 될 수 있으며 이로 인해 시험 구간에서 요동수리반응이 발생했다고 생각할 수 있다. 하지만 이는 정밀실내실험 등을 통해 실증되어야 할 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 연구 지역 내에서 순간충격시험 시 관찰된 요동수리반응을 관정 내 관성효과를 고려하지 않은 기존의 해석방법과 관성효과를 고려한 해석방법을 통해 해석/비교하고, 요동수리반응의 발생 원인에 대해 생각하여 보았다. 기존 Hvorslev 해석법과 Bouwer & Rice 해석법으로 해석해 본 결과 시험 구간의 수리전도도는 type curve를 수리반응의 어느 부분에 맞추느냐에 따라 1차수 이상 차이가 나며 이에 수리전도도의 추정값에 대한 불확실성이 매우 큰 것으로 나타났다. 반면에 관정 내 관성효과를 고려한 수정 Hvorslev 해석법과 수정 Bouwer & Rice 해석법으로 요동수리반응을 해석했을 때는 수리전도도의 추정값이 큰 차이 없이 거의 비슷하였다. 그 결과 요동수리반응은 기존의 해석방법보다는 관성효과를 고려한 해석방법을 통해 해석하여야 보다 정확한 수리전도도를 산정할 수 있다고 판단된다.

기존의 요동수리반응이 관찰된 대수층보다 2~3차수 정도 수리전도도가 낮은 본 연구 지역의 시험 구간에서 요동수리반응이 나타난 이유로, 비교적 큰 부피의 암반에서 소수의 유동성 단열로만 지하수가 빠르게 흐르는 단열 암반 대수층의 특성을 제안하였으며 그 가능성을 간단한 계산을 통하여 평가하였다. 하지만 이는 향후 정밀수리시험을 통하여 검증되어야 할 것이다.

사 사

본 연구는 교육과학기술부 원자력연구개발사업의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Belitz, K., W. Dripps and J.E. Fairchild, 1995, Slug tests in elastic, unconfined aquifers: Incorporating the free surface, *Water Resour. Res.*, 31, 3329-3336.
2. Bouwer, H. and R.C. Rice, 1976, A slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells, *Water Resour. Res.*, 12, 423-428.
3. Butler, J.J., E.J. Garnett and J.M. Healey, 2003, Analysis of slug tests in formations of high hydraulic conductivity, *Ground Water*, 41, 620-630.
4. Cooper, H.H., J.D. Bredehoeft, S.S. Papadopoulos, 1967, Response of a finite diameter-well to an instantaneous charge of water, *Water Resour. Res.*, 3, 263-269.
5. Hvorslev, M.J., 1951, Time lag and soil permeability in groundwater observations, U.S. Army Corps of Eng., *Waterways Exp. Stn. Vicksburg, MS. Bull.* 36, 56 pp.
6. Neuzil, C.E., 1982, On conducting the modified slug test in tight formations, *Water Resour. Res.*, 18, 439-441.
7. Ostendorf, D.W., D.J. DeGroot, P.J. Dunaj and J. Jakubowski, 2005, A closed form slug test theory for high permeable aquifers, *Ground Water*, 43, 87-101.
8. Springer, R.K. and L.W. Gelhar, 1991, Characterization of large scale aquifer heterogeneity in glacial outwash by analysis of slug tests with oscillatory response, Cape Cod, Massachusetts, in *Toxic Substances Hydrology Program, Proceedings of the Technical Meeting, Monterey, California, March 11-15, 1991*, edited by G. Mallard and D. Aronson, U.S. Geol. Surv. *Water Res. Invest. Rep.* 91-4034, pp. 3-40, Reston, Va..
9. van der Kamp, G., 1976, Determining aquifer transmissivity by means of well response tests: The underdamped case, *Water Resour. Res.*, 12, 71-77.
10. Zlotnik, V.A., 1994, Interpretation of slug and packer tests in anisotropic aquifers, *Ground Water*, 32, 761-766.
11. Zlotnik, V.A. and V.L. McGuire, 1998a, Multi-level slug tests in highly permeable formation: 1. Modification of the Springer-Gelhar (SG) model, *J. Hydrol.*, 204, 271-282.
12. Zlotnik, V.A. and V.L. McGuire, 1998b, Multi-level slug tests in highly permeable formation: 2. Hydraulic conductivity identification, method verification, and field applications, *J. Hydrol.*, 204, 283-296.
13. Zurbuchen, B.R., V.A. Zlotnik and J.J. Butler, 2002, Dynamic interpretation of slug tests in highly permeable aquifer, *Water Resour. Res.*, 38, 1025, doi:10.1029/2001WR000354.



류 일 호

2005년 국립공주대학교 자연과학대학
지질환경과학과 이학학사

2007년 국립공주대학교 자연과학대학
지질과학 이학석사

Tel: 02-6330-2500

E-mail: empty15@hanmail.net

현재 (주) 지오그린 21 재직중



지 성 훈

1998년 서울대학교 자연과학대학 지구
환경과학부 이학사

2001년 서울대학교 자연과학대학 지구
환경과학부 이학석사

2005년 서울대학교 자연과학대학 지구
환경과학부 이학박사

Tel: 042-868-4920

E-mail: shji@kaeri.re.kr

현재 한국원자력연구원 선임연구원



고 용 권

1986년 고려대학교 이과대학 지질학과
이학사

1988년 고려대학교 이과대학 지질학과
이학석사

1991년 고려대학교 이과대학 지질학과
이학박사

Tel: 042-868-8159

E-mail: nykkoh@kaeri.re.kr

현재 한국원자력연구원 책임연구원