한국지하수토양환경학회 춘계학술대회
2003년 4월 18-19일 경 원 대 학 교

금산지역 균열암반 대수층에서의 수리이방성 해석

강철희 · 이철우 · 김용제 · 김구영 · 조용찬
한국지질자원연구원
churhee@hanmail.net

요 약 문

이 연구는 국내의 균열암반에 대한 지하수 유동 연구가 대수층이 등방이라는 가정하에 진행되고 있는 방법에서 벗어나 대수층이 이방성을 띤다는 가정하에 대수층의 수리적 이방성을 해석하는데 중점을 두었다. 수리시험은 30.91 m^3/day로 BH-1공에서 300분간 양수였으며, 각각의 관측공 BH-2, BH-3, BH-4, 및 BH-5공에서 시간에 따른 수위강하를 관측하였다. 수리시험에 의해 얻어진 시간별 수위강하 자료를 이용하여 Jacob(1950)[1]의 직선법에 의해서 직선의 기울기(m)와 수위강하가 영이 되는 지점에서의 시간(t_0)을 계산하였다. 대수층의 수리학적 이방성 텐서(tensor) 즉, 최대투수량계수텐서($T_{\xi\xi}$)와 최소투수량계수텐서($T_{\eta\eta}$)를 산출하기 위해서 Stewart(1973)[2]에 의해서 정립된 정규최소제곱(Ordinary least-square)방법을 적용하였으며, 이 방법은 관측공이 최소한 4개를 필요로 한다[3]. 그 결과로, $T_{\xi\xi}$는 12.21 m^2/day이고 $T_{\eta\eta}$는 10.47 m^2/day로 산출되었다. 최대투수량계수텐서의 방향은 N19.13° E 이고 이방성율은 1.17로 산출되었다. BH-1공에서 수리시험시 대수층의 이방성은 등방성에 가깝게 표현되었다. 이는 연구지역 대수층이 다수의 균열에 의해서 수리적 상호연결성이 고루 분포된 것으로 판단된다.

key word : 이방성, 수리시험, 최대투수량계수텐서, 최소투수량계수텐서.

1. 서론

이방성 균열암반 대수층에 설치한 우물에서 인위적인 힘(source)에 의해서 지하수가 배출될 때 지하수 유동은 등수위선에 수직방향이 아닌 균열을 따라 이동하여 밖으로 배출된다. 이때 균열암반에서 수리적 특성으로 나타나는 투수량계수(T)는 크기 뿐만 아니라 방향적인 특성을 갖게되고 텐서로 설명된다. 텐서는 세가지 방향 즉, T_{xx}, T_{yy}, T_{xy}로 정의 되며, 이 세가지 값에 의해서 최대투수량계수텐서와 최소투수량계수텐서가 결정된다. 여기에서 대수층의 이방성율이 클수록 등수위선의 수직방향과 실제 지하수의 유동 방향은 많은 차이를 보인다. 따라서 균열암반에서 지하수 유동이 제한되는 지하공간을 활용하거나, 암반에 유입된 오염물질이 균열을 따라 지하수와 같이 이동되어지는 경우 대수층의 균열에 의한 수리적 이방성은 대수층을 평가하는데 중요한 역할을 한다.

대수층의 수리적 이방성에 대한 연구는 Papadopulos(1965)[4], Hantush(1966)[5] 그리고 Neuman et al.(1984)[6]에 의해 다수의 공(well)을 이용하여 이방성 대수층의 주 투수량계수의 축을 계산하는 방법으로 진행되었다. 이후 Way와 Mckee(1982)[7], Hsieh 외(1985)[8]는 이방성 매질에서의 3차원 수리전도도텐서를 현장에서 계산하는 방법에 관한 연구를 발표하였다. Maslia와 Randolph(1987)[3]는 Papdopulos(1965)[4]의 방법을 좀더 발전시켜 3개 이상의 관측정을 이용하여 2차원 지하수 유동계에서 이방성 투수량계수를 계산하는 컴퓨터 프로그램을 개발하였다.

이 연구의 목적은 정규최소제곱방법을 이용하여 최대투수량계수와 최소투수량계수텐서를 계산하고 연구지역 대수층의 수리적 이방성을 해석하는데 있다.

2. 이방성 대수층의 수리특성

연구지역은 행정구역상 충청남도 금산군 남이면 일대로 BH-1공을 중심으로 십자방향으로 약 10m 간격을 두고 관측공을 시추하였다. 공의 직경은 NX 크기로 굴진하였으며, 각각에 대한 공의 심도는 약 145m이다.

이방성 대수층에서 T는 2차 텐서로써 정의된다(Bear, 1972)[9].

$$T = \begin{pmatrix} T_{xx} & T_{xy} \\ T_{yx} & T_{yy} \end{pmatrix} \quad (1)$$

위 식의 투수량계수텐서는 대칭성($T_{xy} = T_{yx}$)을 갖는다.

지하수 유동방정식은 대수층이 피압, 이방성 이고 무한대로 뻗어있는 있다는 가정하에 일정율 양수시험에 의한 수위강하 분포로써 Papadopulos(1965)[4]에 의해서 아래의 식으로 표현된다.

$$T_{xx}\frac{\partial s^2}{\partial x^2} + 2T_{xy}\frac{\partial s^2}{\partial x \partial y} + T_{yy}\frac{\partial s^2}{\partial y^2} + Q\delta(x)\,\delta(y) = S\frac{\partial s}{\partial t} \quad (2)$$

초기조건과 경계조건은 다음과 같다.

$$s(x, y, 0) = 0,\ s(\pm\infty, y, t) = 0,\ s(x, \pm\infty, t) = 0$$

여기에서, s는 수위강하(L), T_{xx} , T_{yy} , T_{xy}는 이방성 투수량계수텐서(L^2/T), S는 저류계수(L^0), Q는 양수율(L^3/T), δ는 델타함수(Dirac delta function), x, y는 양수정에서 주변관측공에 대한 좌표값(L), t는 양수시간(T)이다.

3. 직선식에 의한 수리인자 산출

Theis(1935)[10]에 의해서 정의된 우물함수 W(u)에서 u(u<0.01)의 값은 오랜시간 동안 수리시험을 하거나 관측공과의 거리 r이 작아지면 u의 값이 매우 작아지므로 소거되어진다.[1] 따라서, 텐서의 성분과 결합하여 시간에 따른 수위강하식을 유도하면 다음과 같다.

$$s = \frac{2.303Q}{4\pi\sqrt{D'}} \log_{10} \frac{2.25t}{S}\left[\frac{D'}{T_{xx}(y^2) + T_{yy}(x^2) - 2T_{xy}(xy)}\right] \quad (3)$$

위 식에서 D'는 크기만을 가지는 투수량계수의 값($(m^2/day)^2$)이다. 위의 식을 이용하여 직선의 기울기와 수위강하가 영이되는 점에서의 시간을 계산할 수 있다.

4. 정규최소제곱 방법과 투수량계수텐서 성분

대수층의 이방성을 규명하기 위해서는 3개의 관측공으로도 해석할수 있지만, 만약 관측공이 대표적인 균열방향과는 다르게 발달한 국부적인 절리에 설치되어 있다고 가정하면 더욱더 많은 관측정을 요구하게 된다.[3] 연구지역 대수층의 이방성을 대표하는 성분을 계산하기 위해서는 네 개의 관측공을 이용하였으며, Stewart(1973)[2]에 의해서 정립된 정규최소제곱방법(Ordinary least-squares)을 적용하였다. 정규최소제곱방법으로 계산되어진 세방향으로의 투수량계수텐서의 값을 아래의 식에 대입하면 최대투수량계수텐서 ($T_{\xi\xi}$)와 최소투수량계수텐서 ($T_{\eta\eta}$)의 값을 계산할 수 있다.

$$T_{\xi\xi} = \frac{1}{2} \cdot \left\{(T_{xx} + T_{yy}) + \sqrt{(T_{xx} - T_{yy})^2 + 4T_{xy}^2}\right\} \quad (4)$$

$$T_{\eta\eta} = \frac{1}{2} \cdot \left\{(T_{xx} + T_{yy}) - \sqrt{(T_{xx} - T_{yy})^2 + 4T_{xy}^2}\right\} \quad (5)$$

대수층의 이방성율은 $T_{\xi\xi}/T_{\eta\eta}$로 정의되며, 직교좌표계의 x축과 최대투수량계수텐서 사이 각은 아래의 식으로 계산되어 진다.

$$\theta = \tan^{-1} \frac{T_{\xi\xi} - T_{xx}}{T_{xy}} \qquad (6)$$

5. 결론

연구지역 대수층의 수리적 이방성을 밝히기 위해 BH-1공을 양수정으로 하여 30.91 m^3/day로 수리시험을 실시하였으며, 네 개의 관측공에서 수리시험이 종료될때까지 수위관측을 실시하였다. 양수종료 시점의 수위강하는 BH-2공이 1.48m, BH-3공이 1.20m, BH-4공이 1.455m 그리고 BH-5공에서는 1.41m 만큼 수위가 강하하였다. 수리시험자료를 토대로 Jacob(1950)[1]의 직선식에서 수리인자(m, t_0)를 계산하였고, 정규최소제곱방법에 의해서 얻어진 $T_{\xi\xi}$는 12.21 m^2/day이고 $T_{\eta\eta}$는 10.47 m^2/day로 산출되었다. 또한 주 텐서방향은 N19.13° E 이고 이방성율은 1.17로 계산되었다. 그리고 방향성을 가지는 관측공의 투수량계수의 값은 BH-2공이 12.03 m^2/day, BH-3공이 9.78 m^2/day, BH-4공이 12.09 m^2/day, BH-5공이 11.50 m^2/day로 계산되었다. 그리고 대수층의 저류계수는 1.06E-4이다. 이 값을 원형좌표계에 도시하면 Fig. 1로 나타난다. 연구지역의 이방성율은 1.17로 거의 1에 가까운 값을 가진다. 이는 BH-1공과 각각의 관측공들 사이 수리적인 연결성이 고루 분포된 것으로 판단된다.

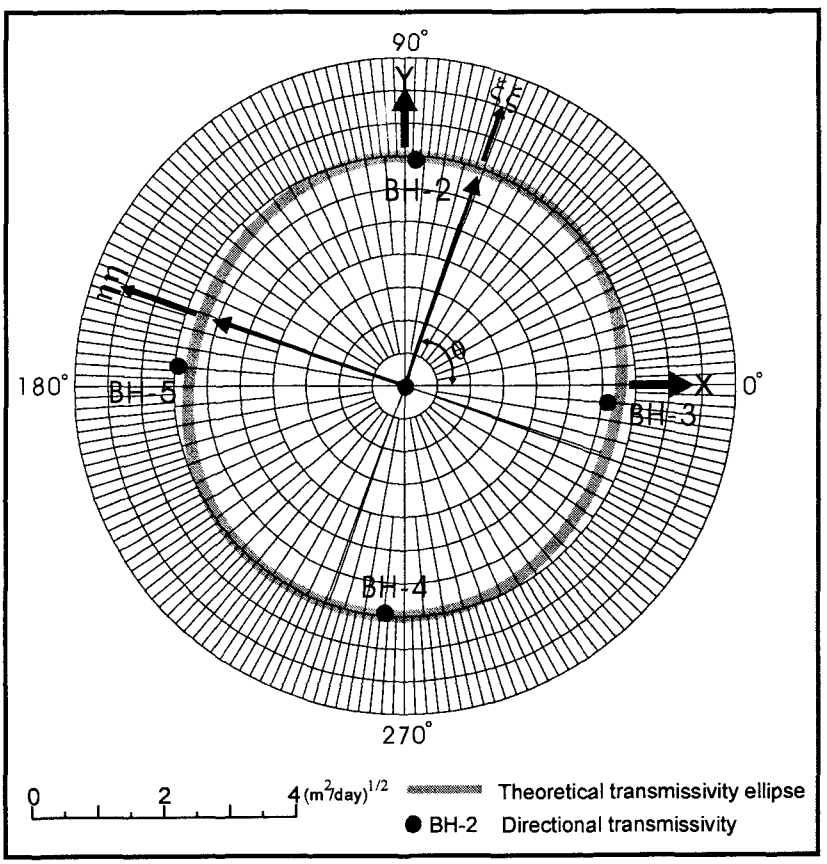

Fig. 1. Comparison of a transmissivity ellipse and directional transmissivity for the aquifer test of BH-1.

사사

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 3-2-1)에 의해 수행되었습니다.

6. 참고문헌

1. Jacob, C.E. "Flow of ground water", in Rouse, H., ed., Engineering Hydraulics, chapter 5, New York, John Wiley, Inc., pp321-386(1950).
2. Stewart, J.W. "Introduction to matrix computations", New York, Academic Press, pp441(1973).
3. Maslia, M. L,. and Randolph, R. B. "Methods and Computer Program Documentation for Determining Anisotropic Transmissivity Tensor Components of Two-Dimensional Ground-Water Flow", U.S.Geological Survey Water-Supply Paper 2308(1987).
4. Papadopulos, I. S. "Nonsteady flow to a well in an infinite anisotropic aquifer", Proceedings of the Dubrovnik Symposium on the Hydrology of Fractured Rocks, International Association of Scientific Hydrology, pp21-31(1965).
5. Hantush, M. S. "Analysis of Data from Pumping Tests in Anisotropic Aquifer" Jour. Geophysical, Res., 71(2), pp421-426(1966).
6. Neuman, S.P., G.R. Walter, H.W. Bentley, J.J. Ward, and D.D. Gonzalez. "Determination of Horizontal Aquifer Anisotropy with Three Wells", Ground Water, 22(1), pp66-72(1984).
7. Way, S. C., and McKee, C. R. "In-situ determination of three-dimensional aquifer permeabilities", Groundwater, 20(5), pp.594~603(1982).
8. Hsieh, P. A., Neuman, S. P., Stiles, G. K., and Simpson, E. S. "Field determination of three-dimensional hydraulic conductivity tensor of anisotropic media, 2. Methodology and application to fractured rocks", Water Resour. Res., 12(11), pp1667-1676(1985).
9. Bear, Jacob. "Dynamic of Fluids in Porous Media" New York, American Elsevier Publishing Company, pp764(1972).
10. Theis, C.V. "The relation between the lowering of piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage", Trans. Am. Geophys. Union., v.16, pp519-524(1935).