

## 이방성 대수층에서의 투수량계수텐서 해석

강철희<sup>1</sup> · 이대하<sup>1</sup> · 김구영<sup>1</sup> · 이철우<sup>1</sup> · 김용재<sup>1</sup> · 우남칠<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국지질자원연구원 환경지질연구부 · <sup>2</sup>연세대학교 지구시스템과학과

## Analysis of transmissivity tensor in an anisotropic aquifer

**'Chul-Hee Kang, 'Dae-Ha Lee, 'Kue-Young Kim, 'Chul-Woo Lee, 'Yongje Kim, 'Nam-Chil Woo**

*<sup>1</sup>Environmental Geology Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources*

*<sup>2</sup>Dept. of Earth Systems Science, Yonsei University*

## ABSTRACT

An Aquifer test was carried out on five boreholes to determine the hydrologic anisotropy and the major groundwater flow direction in the aquifer system of the study area. With an assumption of the aquifer's anisotropy and homogeneity, the major transmissivity( $T_{\text{ff}}$ ), the minor transmissivity( $T_{\text{mm}}$ ), and primary tensor direction ( $\theta$ ) for each borehole were determined from the test. Besides the boreholes BH-1, BH-4, and BH-5, the anisotropy transmissivity tensor values of BH-2 and BH-3 did not correspond with the assumption. Thereafter, the values were plotted on the polar coordinate, and showed that the tensor values were out of the anisotropy ellipsoid due to the high heterogeneity of BH-2 and BH-3 comparing with the other boreholes. Therefore, the anisotropy of the aquifer was examined from BH-1, BH-4, and BH-5. In BH-1,  $T_{\text{ff}}$  is 171.9 m<sup>2</sup>/day,  $T_{\text{mm}}$  is 71.01 m<sup>2</sup>/day, and the principal tensor direction is N15.39°E. In BH-4,  $T_{\text{ff}}$  is 268.2 m<sup>2</sup>/day,  $T_{\text{mm}}$  is 28.75 m<sup>2</sup>/day, and the principal tensor direction is N7.55°E. In BH-5,  $T_{\text{ff}}$  is 168.4 m<sup>2</sup>/day,  $T_{\text{mm}}$  is 66.80 m<sup>2</sup>/day, and the principal tensor direction is N76.59°E. On the basis of televIEW logging performed on each borehole, the principal fracture directions

\* Corresponding author : renee@kigam.re.kr

원고접수일 : 2002. 4.20 계재승인일 : 2002. 5.22

were revealed as N0° ~ 4° E/30° ~ 50° SE and N30° ~ 80° W/20° ~ 50° NE that are the most frequently occurred sets as well as that correspond well with the calculated transmissivity tensor.

**Key Words :** Transmissivity tensor, Anisotropy, Aquifer test, Fractured rock aquifer

## 요약문

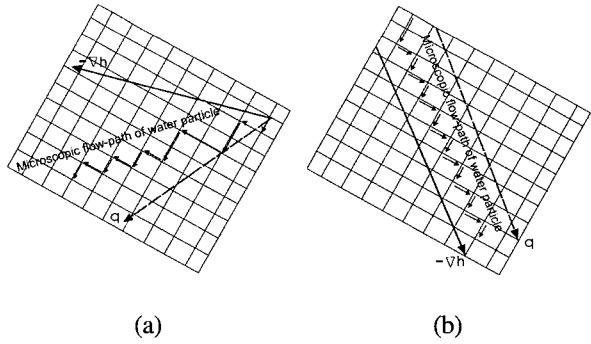
본 연구에서는 5개의 시추공에 대한 수리시험을 실시하여 대수층의 수리학적 이방성과 지하수의 주 유동방향을 규명하고자 하였다. 수리시험을 통하여 각각의 공에 대한 최대 투수량계수( $T_{\text{max}}$ )와 최소 투수량계수( $T_{\text{min}}$ )값을 산출하고 주 텐서방향( $\theta$ )을 결정하였다. 그 결과 대수층의 비균질성으로 인해 투수량계수텐서값을 원형좌표계에 도시하였을 때 BH-1, BH-4, BH-5공을 제외한 BH-2, BH-3호공의 경우 다른 공에 비해서 이방성타원체에서 많이 벗어남을 보였다. BH-2, BH-3호공을 제외한 3개의 공에서 대수층의 이방성을 분석한 결과, BH-1호공에서 양수시  $T_{\text{max}}$ 는 171.90m<sup>3</sup>/day,  $T_{\text{min}}$ 는 71.01m<sup>3</sup>/day이고 주 텐서방향은 N15.39° E로 나타났다. BH-4호공에서 양수시  $T_{\text{max}}$ 는 268.20m<sup>3</sup>/day,  $T_{\text{min}}$ 는 28.75m<sup>3</sup>/day이고 주 텐서방향은 N7.55° E이며, BH-5호공에서 양수시는 168.40m<sup>3</sup>/day,  $T_{\text{min}}$ 는 66.80m<sup>3</sup>/day이고 주 텐서방향은 N76.59° E로 나타났다. 이 결과는 균열군의 방향을 알아보기 위해 각 공에서 실시한 초음파주사검층 결과인 N0° ~ 40° E/30° ~ 50° SE, 그리고 N30° ~ 80° W/20° ~ 50° NE 방향과 잘 일치하고 있다.

**주제어 :** 투수량계수텐서, 이방성, 수리시험, 암반대수층

## 1. 서 론

지하수 유동은 다시의 법칙(Darcy's law)을 따르며 등방매질의 경우 비배출율(specific discharge)  $q$ 와 수리경사(hydraulic gradient)  $\nabla h$ 는 같은 방향이며 수리전도도  $K$ 는 두 벡터의 크기에 대한 관계를 결정하는 비례상수의 역할을 한다. 즉,  $q = K \nabla h$ 와 같이 표현된다. 그러나 결정질 암반에서의 지하수 유동은 일반적으로 지표하에 발달되어 있는 균열에 의해 지배되며, 지하수는 등수위선에 수직방향이 아닌 균열이 발달한 방향으로 유동한다(Fig. 1). 따라서 이방성 대수층에서의 지하수 유동은  $q = K \nabla h$ 와 같이 표현된다. 이때  $K$ 는 텐서이며 좀더 ‘일반화된’ 비례상수로서 두 벡터  $q$ 와  $\nabla h$ 의 크기에 대한 것 뿐만 아니라 방향에 대한 관계까지 내포하고 있다.

국내 대수층과 같이 대부분 균열암반으로 구성되어 있는 경우 지하수 유동 해석에 있어 중요한 역할을 하는 수리전도도는 단순한 상수가 아니라 방향에 따라



**Fig. 1. The relation between negative hydraulic gradient ( $-\nabla h$ ) and specific discharge ( $q$ ) in an anisotropic aquifer. (A) Hydraulic gradient ( $-\nabla h$ ) and discharge ( $q$ ) are aligned along different directions in an anisotropic aquifer. (B) Hydraulic gradient ( $-\nabla h$ ) and discharge ( $q$ ) are parallel and aligned along the principal directions in an anisotropic aquifer (after Maslia and Randolph, 1987).**

그 값이 변하는 텐서로 해석해야 함에도 불구하고 많은 연구가 등방매질을 가정하고 있다. 이러한 균열암반에서의 지하수유동을 좀더 자연현상에 근접하게 해석하기 위해서는 이방성에 대한 고려는 필수적이라 할 수 있다.

대수층의 수리적 이방성에 대한 연구는 1960년대부터 다수의 연구자에 의해 진행되었다. Papadopoulos(1965)<sup>1)</sup>는 이방성 대수층에서 양수정으로 유동하는 부정류 흐름에 관한 연구를, Hantush(1966)<sup>2)</sup>는 이방성 대수층에서의 양수시험 자료를 해석하는 방법에 관한 연구를 수행하였다. 이후 Way와 McKee(1982)<sup>3)</sup>, Hsieh 외(1985)<sup>4)</sup>는 이방성 매질에서의 3차원 수리전도도텐서를 현장에서 계산하는 방법에 관한 연구를 발표하였다. Maslia와 Randolph(1987)<sup>5)</sup>는 Papdopoulos

(1965)<sup>1)</sup>의 방법을 좀더 발전시켜 3개 이상의 관측정을 이용하여 2차원 지하수 유동계에서 이방성 투수량계수를 계산하는 컴퓨터 프로그램을 개발하였다.

본 연구에서는 연구지역내에 분포하는 암반대수층의 수리학적 이방성을 밝히고, 지하암반의 균열방향과의 상관성을 규명하고자 하였다. 이를 위해 연구지역에 설치된 5개 공에서 수리시험을 실시하여 이방성 규명에 필요한 수리인자를 산출하였고, 원형좌표계에 연구지역 지표하 대수층의 수리적 이방성을 도식하기 위해서 정규최소제곱(OLS)법을 이용하여 투수량계수텐서를 구하였다. 연구결과는 초음파주사검층 자료를 통해서 얻어진 균열방향과의 비교를 통해서 연구지역에서의 지하수 유동방향을 검증하였다.

## 2. 연구지역의 지질 및 지표하 단열특성

본 연구지역은 경기도 남양주시 별내면 광전리에 위치해있으며, 좌표상 동경  $127^{\circ} 05'00'' \sim 127^{\circ} 10'00''$ 이고 북위  $37^{\circ} 37'30'' \sim 37^{\circ} 45'00''$ 에 속하고 있다.

이 지역의 주요지질은 선캄브리아 편마암류와 이를 관입한 쥬라기의 흑운모화암과 산성암맥, 그리고 상기 암체들을 부정합으로 피복하는 제4기 충적층으로 구성된다(Fig. 2). 선캄브리아 편마암류는 변성작

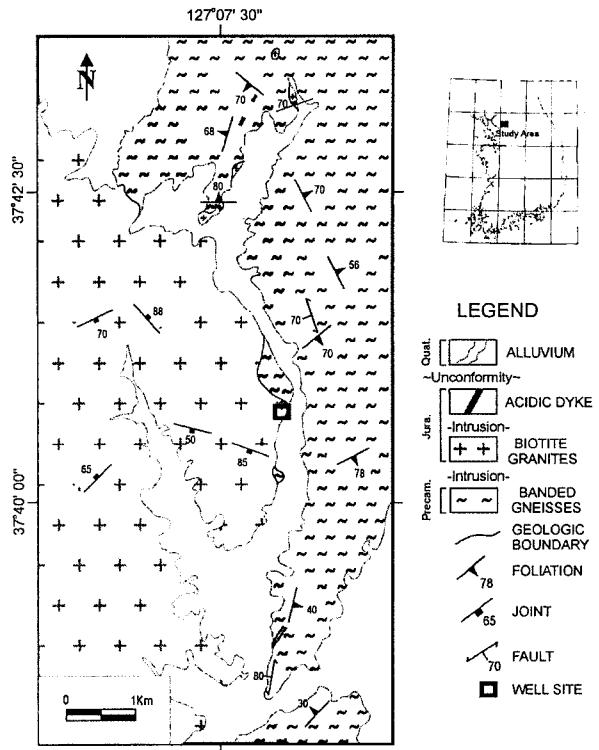


Fig. 2. A geological map of the study area.

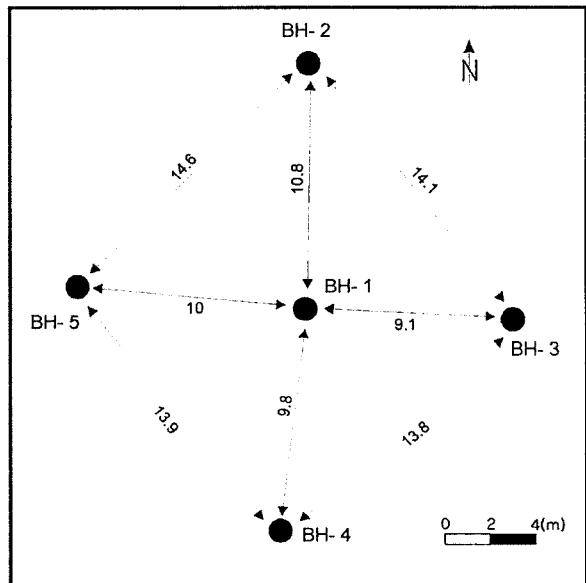


Fig. 3. A schematic diagram of boreholes array in the study area.

용에 따라 일부지역에서 혼성편마암과 반상변정질 편마암으로 여겨지는 부분이 소규모로 나타나며, 연구지역은 주로 호상편마암으로 이루어져 있다<sup>6)</sup>.

연구지역내에 설치된 관정의 배열은 Fig. 3과 같다. 지표하 단열특성을 알아보기 위해 각공에 대한 초음파 주사검증을 실시하여 연구지역의 지표하 집중성을 보이는 균열의 방향을 크게 3개로 분류하였다. (1) N0°~40°E/30°~50°SE 그리고 N30°~80°W/20°~50°NE, (2) N0°~50°E/60°~80°NW, (3) N30°~50°W/70°~80°SW<sup>7)</sup>.

### 3. 이론적 배경

#### 3.1 수리적 이방성

투수량계수( $T$ )는 직교좌표계에서 2차 텐서로써 다음과 같다.

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

투수량계수텐서는 대칭(symmetric)이므로<sup>8)</sup>  $T_{xy} = T_{yx}$ 이며, 식 (1)을 행렬식으로 표현하면 다음과 같다.

$$D' = T_{xx} T_{yy} - (T_{xy})^2 \quad (2)$$

이방성 대수층에서 양수시 지하수유동 방정식은 다음과 같다<sup>9)</sup>.

$$\begin{aligned} T_{xx} \frac{\partial s^2}{\partial x^2} + 2T_{xy} \frac{\partial s^2}{\partial x \partial y} + T_{yy} \frac{\partial s^2}{\partial y^2} + \\ Q\delta(x)\delta(y) = S \frac{\partial s}{\partial t} \end{aligned} \quad (3)$$

위 지배방정식의 해는 Theis(1935)<sup>9)</sup>의 type curve 또는 Jacob(1950)<sup>10)</sup>의 직선법을 이용한 Papadopoulos(1965)<sup>11)</sup>에 의한 직선법의 시간-수위강하식으로 식 (4)로 정의된다.

$$s = \frac{2.303Q}{4\pi\sqrt{D'}} \log_{10} \frac{2.25t}{S} \times$$

$$[ = \frac{D'}{T_{xx}(y^2) + T_{yy}(x^2) - 2T_{xy}(xy)} ] \quad (4)$$

여기서,  $s$ 는 수위강하[L],  $Q$ 는 양수율[L<sup>3</sup>/T],  $t$ 는 경과시간[T],  $S$ 는 저유계수,  $D'$ 는 행렬식,  $x$ ,  $y$ 는 직각좌표계에서 양수정에서 관측정까지의 좌표[L],  $T_{xx}$ ,  $T_{yy}$ ,  $T_{xy}$ 는 이방성 투수량계수텐서 성분[L<sup>2</sup>/T]이다.

식 (4)로 부터 행렬식  $D'$ 으로 정의하면,

$$D'_{ij} = \left[ \frac{2.303Q}{4\pi n} \right]^2 \quad (5)$$

이다. 여기서,  $i$ 는 양수정,  $j$ 는 관측정번호,  $m$ 은 직선의 기울기이다.

텐서성분과 이방성 대수층 요소값을 계산하기 위하여  $T_{xx}$ ,  $T_{yy}$ ,  $T_{xy}$ 와 저류계수  $S$ 값을 결정하여야 하며 이를 위해서는 하나의 양수정과 최소 3개의 관측정이 필요하다<sup>5)</sup>.

식 (4)의 log 이후의 항을  $t_0$ 로 놓고 재배열하여 각 관측정에 대해 표현하면 아래와 같은 선형방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} ST_{xx}(y_m^2) + ST_{yy}(x_m^2) - 2ST_{xy}(x_my_m) \\ = 2.25t_0 D'_{avg} \end{aligned} \quad (6)$$

윗식에서  $x$ ,  $y$ 는 직각좌표계에서의 각각의 관측정에 대한 좌표값이고,  $m$ 은 각각의 관측정번호,  $x = a \cos \theta$ ,  $y = a \sin \theta$ 로 계산되어진다. 여기서,  $a$ 는 양수정에서 관측정까지의 최단거리이며,  $\theta$ 는 좌표계의 X축을 기준으로 반시계방향으로 관측정까지의 각도(degree)이다.  $D'$ 의 값은 양수시험을 통해서 각각의 관측정에서 얻은  $D'$ 의 평균값을 취한다.

식 (6)을 계산하기 위하여 행렬로 표현하면 아래와 같다.

$$AX = B \quad (7)$$

여기서,

$$A = \begin{bmatrix} y_1^2 & x_1^2 - 2x_1y_1 \\ y_2^2 & x_2^2 - 2x_2y_2 \\ y_3^2 & x_3^2 - 2x_3y_3 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$X = \begin{pmatrix} ST_{xx} \\ ST_{yy} \\ ST_{xy} \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$B = \begin{pmatrix} 2.25(t_0)_1 D'_{avg} \\ 2.25(t_0)_2 D'_{avg} \\ 2.25(t_0)_3 D'_{avg} \end{pmatrix} \quad (10)$$

윗 식은 한 개의 양수정과 세 개의 관측정을 기준으로 한 식이며,  $x_m, y_m, (t_0)_m$ 의  $m=1, 2, 3$ 은 각각 관측정의 번호이다. 식 (7)~(10)을 이용하여 변수  $ST_{xx}, ST_{yy}, ST_{xy}$ 에 대한 값들을 얻을 수 있다.

식 (2)의 양변에 을 취한 후  $S^2$ 을 취한 후  $S$ 에 대해 정리하면,

$$S = \sqrt{\frac{(ST_{xx})(ST_{yy}) - (ST_{xy})^2}{D'_{avg}}} \quad (11)$$

윗 식으로부터  $S$ 를 구하고 세 방향으로의 투수량계수 텐서는 아래의 식으로부터 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} T_{xx} &= (ST_{xx})/S \\ T_{yy} &= (ST_{yy})/S \\ T_{xy} &= (ST_{xy})/S \end{aligned} \quad (12)$$

최대투수량계수텐서와 최소투수량계수텐서를 결정하기 위해서는 고유치문제를 해결해야 한다.

$$TX = \lambda X \quad (13)$$

즉, 최대투수량계수 텐서와 최소투수량계수 텐서의 값은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{\text{ss}} = \frac{1}{2} \cdot \{ (T_{xx} + T_{yy}) + \sqrt{(T_{xx} - T_{yy})^2 + 4T_{xy}^2} \} \quad (14)$$

$$T_{\text{ss}} = \frac{1}{2} \cdot \{ (T_{xx} + T_{yy}) - \sqrt{(T_{xx} - T_{yy})^2 + 4T_{xy}^2} \} \quad (15)$$

대수층의 이방성율(aquifer anisotropy ratio)은 아래와 같이 표현된다.

$$\text{Aquifer anisotropy ratio} = \frac{T_{\text{ss}}}{T_{yy}} \quad (16)$$

직교 좌표계에서 X축과 최대투수량계수텐서와의 각은 식 (17)으로 표현된다.

$$\theta = \tan^{-1} \frac{T_{\text{ss}} - T_{xx}}{T_{xy}} \quad (17)$$

위에서 구한 투수량계수텐서를 원형좌표계에 도시하였을 때 이방성에 의해서 최대투수량계수와 최소투수량계수를 가지는 타원체가 생기게 된다. 이 타원체에 각각의 관측정에 대한 방향성을 가지는 투수량계수( $T_d$ )를 계산하여야 한다.

$$T_d = r^2 \left\{ \frac{D'}{T_{xx}(y^2) + T_{yy}(x^2) - 2T_{xy}(xy)} \right\} \quad (18)$$

위 식은 간단히 다음과 같이 표현된다.

$$T_d = \frac{Sr^2}{2.25t_0} \quad (19)$$

식 (19)를 이용하여 각각의 관측정에 대한 이방성인 타원체에 접근할 수가 있다.

### 3.2 최소제곱 최적화

(Least-squares optimization)

대수층이 균질하면 3개의 관측정으로 이방성을 계산할 수 있지만, 자연상태에서 균질한 대수층은 드물며 3개의 관측정만으로는 이방성을 규명할 수 없다. 이는 대표적인 균열방향과는 다르게 발달한 국부적인 절리에 관측정이 설치되어 있을 수 있기 때문이다. 그러므로, 현장에서 지하수 유동의 방향적인 투수량계수텐서 특성에 관한 추가적인 정보를 얻기 위해서는 3개의 관측정보다 많은 관측정을 요구한다.

3개의 관측정보다 더 많은 관측정을 이용하여 이방성을 규명하고자 할 때에는 정규최소제곱법(OLS)을 이용한다.

Stewart(1973)<sup>11)</sup>에 의하면 정규최소제곱법은 다음과 같다.

$$X = (A^T A)^{-1} A^T B \quad (20)$$

#### 4. 연구지역 대수층의 수리적 이방성

연구지역에 분포하는 대수층의 수리적 이방성을 규명하기 위해 5개 공에서 수리시험을 실시하였다. 본 연구에서의 수리시험 해석은 Cooper와 Jacob(1946)<sup>10</sup>이 가정한  $u < 0.1$ 을 만족하므로 근사해인 직선법을 이용하여 이방성에 필요한 수리인자를 산출하였다. 식 (5)를 이용하여 각 관측정에서 계산한  $D'$ 값은 대략 같은 값을 가져야 하지만 그렇지 않은 경우 그 평균값을 이용하였다<sup>5</sup>. 그 결과를 Table 1에 정리하였다.

본 연구에서는 연구지역의 비균질성을 고려하여 3개의 이상의 관측정에서의 수위강하 자료를 이용하였다. 따라서 Maslia와 Randolph(1987)<sup>5</sup>가 제안한 최소제곱 최적화 방법을 이용하였다. 양수정 한 개를 중심으

로 주변의 4개 관측정을 이용하여 해를 산출하였으며, 양수정으로는 BH-1, 4, 5호공을 이용하였다. BH-2호공과 3호공에서 양수시 이방성 모사는 이방성 타원체가 방향성을 가지는 관측정들의 투수량계수 값에서 많이 벗어 남으로 본 논문에서 제외시켰다.

이방성텐서를 산출하기 위해서 5개공에 대해서 각각 양수시험을 실시한 값을 토대로 수리인자를 산출하고 이 값을 이용하여 식 (20)의 행렬로 표현하고 A, B를 대입하면 변수  $X (=ST_{xx}, ST_{yy}, ST_{xy})$ 를 구할 수 있다. 저류계수는 식 (11)에 의해서 계산되며, 식 (12)에 저류계수 값을 대입하여 세방향으로의 이방성텐서를 구할 수 있다. 이방성 타원체에 대한 최대투수량계수텐서와 최소투수량계수 텐서는 식 (14)과 (15)로 구할 수 있다. 그리고 대수층 이방성 비와 직교좌표계에서 x축과 최대투수량계수 텐서가 이루는 각은 식 (16)과 (17)을 통해서 구할 수 있다. 이러한 값을 이용

**Table 1. The calculated Parameters using Straight-Line Approximation**

Pumping well	Observation well	m (slope)	$t_0$ (day)	$D'$ (m <sup>2</sup> /day)	$D_{avg}$
BH-1	BH-2	0.099138	4.71E-4	1402.71	12207.73
	BH-3	0.017312	3.70E-4	45995.19	
	BH-4	0.118842	7.29E-4	976.13	
	BH-5	0.173707	1.74E-3	456.89	
BH-2	BH-1	0.058739	1.61E-4	3296.34	30225.47
	BH-3	0.009918	1.73E-4	115621.04	
	BH-4	0.091899	1.78E-3	1346.70	
	BH-5	0.133537	2.28E-3	637.82	
BH-3	BH-1	0.0173270	7.53E-4	39708.47	26528.17
	BH-2	0.0217107	8.03E-4	25291.95	
	BH-4	0.0214764	1.83E-3	25846.81	
	BH-5	0.0279454	4.80E-3	15265.44	
BH-4	BH-1	0.1063800	9.52E-4	934.86	7711.13
	BH-2	0.0717416	1.29E-3	2055.53	
	BH-3	0.0197891	2.73E-3	27015.62	
	BH-5	0.1123260	4.31E-3	838.51	
BH-5	BH-1	0.0899223	1.67E-3	599.33	11246.21
	BH-2	0.0846803	1.85E-3	675.82	
	BH-3	0.0106358	2.31E-3	42840.89	
	BH-4	0.0746855	2.65E-3	868.81	

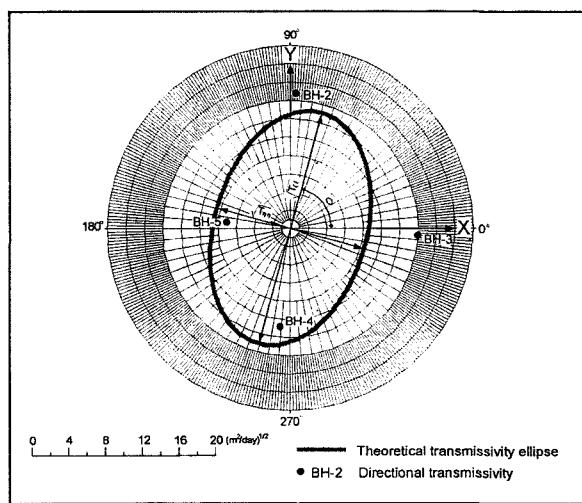
**Table 2. The Results of Tensor Analysis for each Pumping Well**

Pumped Well	$T_{xx}$ ( $m^2/day$ )	$T_{yy}$ ( $m^2/day$ )	$T_{xy}$ ( $m^2/day$ )	$T_{\xi\xi}$ ( $m^2/day$ )	$T_{\eta\eta}$ ( $m^2/day$ )	$\theta$
BH-1	7.811E+1	1.648E+2	2.581E+1	1.719E+2	7.101E+1	N15.39° E
BH-2	8.411E+1	7.387E+2	1.786E+2	7.843E+2	3.854E+1	N14.31° E
BH-3	1.637E+2	1.708E+2	3.789E+1	2.053E+2	1.292E+2	N42.34° E
BH-4	3.289E+1	2.641E+2	3.121E+1	2.682E+2	2.875E+1	N 7.55° E
BH-5	1.629E+2	7.226E+1	2.291E+1	1.684E+2	6.680E+1	N76.59° E

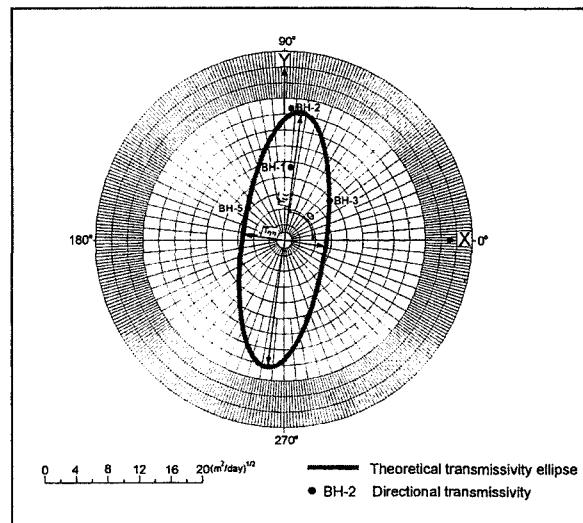
하여 원형좌표계에 이방성타원체를 도식할 수 있으며, 각각의 관측정에 해당되는 방향투수량계수( $T_d$ )는 식 (19)를 이용하여 계산하고 원형좌표계에 도식함으로써 양수시 주변 관측정들에 의한 대수층의 이방성을 모사하였다. BH-1호공에서 양수시  $T_{\xi\xi}$ 는  $171.90 m^2/day$ ,  $T_{\eta\eta}$ 는  $71.01 m^2/day$ 이고 주 텐서방향은 N15.39° E로 나타났다. BH-4호공에서 양수시  $T_{\xi\xi}$ 는  $268.20 m^2/day$ ,  $T_{\eta\eta}$ 는  $28.75 m^2/day$ 이고 주 텐서방향은 N7.55° E이다. BH-5호공에서 양수시  $T_{\xi\xi}$ 는  $168.40 m^2/day$ ,  $T_{\eta\eta}$ 는  $66.80 m^2/day$ 이고 주 텐서방향은 N76.59° E로 나타났다(Table 2). 이를 근거로 하나의 양수정을 중심으로 각각의 관측정에 대한 대수층의 이

방성 모사는 Fig. 4, 5, 6에 나타내었다. BH-1, 4, 5호공에서의 이방성 율은 2.42, 9.33, 2.52로써 이방성타원체를 연구지역에 도시한 결과는 Fig. 7과 같다. 각각의 공에 대한 BH-4호공에 양수시 주변관측정 사이에서의 이방성 율이 가장 큰 값을 가진다(Fig. 7).

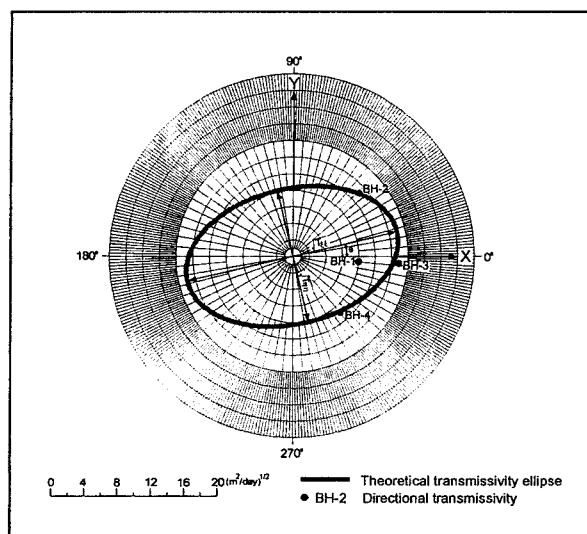
이 결과를 지하암반의 균열방향과의 상관성을 규명하기 위해 각 공에서 초음파주사검증을 실시하였고, 자료를 통해서 얻어진 균열방향과의 비교를 통해서 연구지역에서의 지하수 유동방향을 검증하였다. 검증 결과, 크게 세 방향의 균열군이 집중성이 나타났다. 가장 빈도가 높은 균열의 방향은 N0°~40° E/30°~50° SE 그리고 N30°~80° W/20°~50° NE 방향이 함께



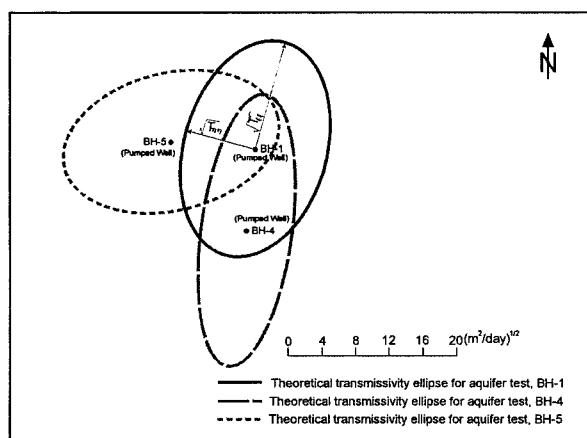
**Fig.4. Comparison of a transmissivity ellipse and directional transmissivity for the aquifer test of BH-1.**



**Fig.5. Comparison of a transmissivity ellipse and directional transmissivity for the aquifer test of BH-4.**



**Fig. 6. Comparison of a transmissivity ellipse and directional transmissivity for the aquifer test of BH-5.**



**Fig. 7. A schematic diagram of transmissivity tensor in the study area.**

나타났으며 두 번째 균열의 방향은  $N0^\circ \sim 50^\circ E / 60^\circ \sim 80^\circ NW$ 로 나타났다. 세 번째 방향은  $N30^\circ \sim 50^\circ W / 70^\circ \sim 80^\circ SW$  방향의 균열로 구성된다. 이처럼 지표 하에서는 크게 세 방향의 균열이 다른 방향을 보이는 균열에 비해 상대적으로 큰 빈도를 가지며 발달하고 있음을 알 수 있다. 이방성텐서 분석 결과는 초음파주

사검증 결과 가장 빈도가 높게 나타난 균열방향인  $N0^\circ \sim 40^\circ E$  그리고  $N30^\circ \sim 80^\circ W$  방향과 잘 일치하고 있다.

## 5. 결 론

결정질 암반에서의 지하수 유동은 일반적으로 지표 하에 발달되어있는 균열에 의해 영향을 받으므로 대수 층의 이방성에 대한 고려는 필수적이라 할 수 있다. 본 연구에서는 연구지역내에 분포하는 암반대수층의 수리학적 이방성을 밝히고, 지하암반의 균열방향과의 상관성을 규명하였다. 이를 위해 연구지역에 설치된 5개 공에서 수리시험을 실시하여 이방성 규명에 필요한 수리인자를 산출하였고, 투수량계수텐서를 계산하였으며 이를 원형좌표계에 연구지역의 수리적 이방성을 도식하였다.

BH-2호공과 BH-3호공에서 양수에 의해서 구한 이방성 투수량계수텐서는 현장의 비균질성에 의해 이방성 타원체의 영향 범위에서 벗어났기 때문에 해석에서 제외하였으며, 수리시험을 통해서 원형좌표계에 도시된 양수정 BH-1, BH-4, BH-5호공의 이방성 투수량계수텐서와 주 방향은 각각  $T_{\text{ss}} = 171.90 \text{ m}^3/\text{day}$ ,  $T_{\text{nn}} = 71.01 \text{ m}^3/\text{day}$ ,  $N15.39^\circ E$ ,  $T_{\text{ss}} = 268.20 \text{ m}^3/\text{day}$ ,  $T_{\text{nn}} = 28.75 \text{ m}^3/\text{day}$ , 주 텐서방향은  $N7.55^\circ E$ ,  $T_{\text{ss}} = 168.40 \text{ m}^3/\text{day}$ ,  $T_{\text{nn}} = 66.80 \text{ m}^3/\text{day}$ ,  $N76.59^\circ E$ 이다. 각 공에 대한 이방성 율은 2.42, 9.33, 2.52로써 BH-4호공에 양수시 주변관측정 사이에서의 이방성 율이 가장 큰 값을 가진다. 이것으로 보아 BH-4호공에서 양수할 때 지하수의 주 유동이 다른공에서 양수할때보다 한방향으로 우월하게 발생된다고 보아진다.

지하암반의 균열방향과 원형좌표계에 도시된 이방성 주 텐서방향과 연관시켜 보면, 지하암반에서 가장 집중성을 보이는 균열방향인  $N0^\circ \sim 40^\circ E$ 에 이방성 주 텐서방향이 속하는 것을 알 수 있다. 이는 이 방향으로 지하수의 유동이 우세할것이라고 보아지며 다른 균열 방향으로도 지하수유동이 발생되지만 미미한 상태일 것이라 판단된다.

## 사 사

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

## 참 고 문 헌

1. Papadopoulos, 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, pp. 21~31 (1965)
2. Hantush, M. S., "Analysis of Data from Pumping Tests in Anisotropic Aquifer" Jour. Geophysical, Res., 71(2), pp. 421~426 (1966)
3. Way, S. C., and McKee, C. R., "In-situ determination of three-dimensional aquifer permeabilities", Groundwater, 20(5), pp. 594~603 (1982)
4. 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), pp. 1667-1676 (1985)
5. 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)
6. 이대하 외, 암반내의 열극해석과 지하수 유동 및 흡착연구, 한국지질자원연구원, KR-99(B)-05, pp. 149~154 (1999)
7. 채병곤, 이대하, 김유성, 황세호, 기원서, 김원영, 이승구, "단열조사 및 물리검증을 통한 지표하 단열특성 해석", 한국지반환경공학회논문집, 2(1), pp. 37~56 (2001)
8. Bear, J., Hydraulics of groundwater. New York, McGraw Hill, pp. 567 (1979)
9. 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, pp.519~524 (1935)
10. Cooper, H. H., and Jacob, C. E., "A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history", American Geophysical Union Transaction, 27(4), pp. 526~534 (1946)
11. Stewart, G. W., Introduction to matrix computations, New York, Academic Press, pp. 441 (1973)