

# 토양층에서 지하수 수리경사와 주 흐름 방향 분석

## Analyses for hydraulic gradient and major flow direction of groundwater in the soil aquifer

김태영\*, 강동환\*\*, 김성수\*\*\*, 권병혁\*\*\*\*, 유훈선\*\*\*\*\*

Tae Yeong Kim, Dong Hwan Kang, Sung Soo Klm, Byung Hyuk Kwon, Hun Sun Yu

### 요 지

본 연구에서는 토양층에서 지하수 수리경사와 주 흐름 방향을 산정하여 변동특성을 분석하고, 그 원인에 대해 고찰하였다. 연구부지는 부경대학교 환경연구동 앞 잔디밭이며, 2008년 10월 18일 ~ 11월 1일의 기간 중 12일(10월 21, 28일은 관측 못함) 동안 24회 관측되었다. 관측된 지하수공은 9개공이며, 4 m × 4 m의 정방형으로 설계되었다. 지하수위에 의한 수리경사와 주 흐름 방향의 산정은 총 9가지 형태의 평면으로 가정하여 산정하였다. 수리경사와 주 흐름 방향을 산정하기 위한 평면은 모두 9가지 형태로 가정하였다. 첫 번째는 9개공 모두를 이용한 정방형 평면(TW), 두 번째는 6개공을 이용한 4가지 경우의 삼각형 평면(T1, T2, T3 및 T4), 세 번째는 6개공을 이용한 4가지 경우의 직사각형 평면(R1, R2, R3 및 R4)으로 가정하여 각각의 평면에서 수리경사와 주 흐름 방향을 산정하였다. 이상에서 가정된 9가지 평면에서 산정된 평균 수리경사는 0.0094(R2) ~ 0.0123(T2)의 범위로 나타났으며, 9개공 모두를 이용한 평면(TW)에서의 평균 수리경사는 0.0109로 산정되었다. 관측기간 동안 T1과 T3 평면의 평균 주 흐름 방향은 각각 -84.9818과 -86.2487로서, 다른 7개 평면의 평균 주 흐름 방향이 79.7045(T4) ~ 85.8405(TW)의 범위로 나타난 것과는 반대의 흐름 방향을 보였다. 이러한 결과는, 본 연구에 적용된 수리경사와 주 흐름 방향의 산정 기법(Devlin, 2003)이 삼각형 형태의 평면에는 부적합할 수 있음을 보여주는 것이다. 관측기간 중 10월 12일에 내린 소량의 강우(12 mm)에 의한 수리경사와 주 흐름 방향의 변동은 크게 나타나지 않았다. 본 연구에서는 정방형, 삼각형 및 직사각형의 평면 토양층에서 지하수의 수리경사와 주 흐름 방향을 산정하여 전체 및 국부적인 부지에서의 차이를 파악하고, 평면의 형태에 따른 수리경사와 주 흐름 방향의 차이 또한 확인할 수 있었다.

**핵심용어 : 토양층, 지하수위, 수리경사, 주 흐름 방향**

### 1. 서론

지하수 유동은 지하수위의 차이에 의한 수리경사(hydraulic gradient)에 의해 발생한다. 자유면

\* 비회원 · 부경대학교 환경지질학과 이학석사 · E-mail : kimty@pknu.ac.kr  
\*\* 정회원 · 부경대학교 환경지질학과 계약교수 · E-mail : dhkang@pknu.ac.kr  
\*\*\* 비회원 · 부경대학교 환경지질학과 이학석사 · E-mail : kimss@pknu.ac.kr  
\*\*\*\* 정회원 · 부경대학교 환경대기학과 교수 · E-mail : bhkwon@pknu.ac.kr  
\*\*\*\*\* 비회원 · 동의과학대학 동의분석센터 이학석사 · E-mail : yuhunsun@dit.ac.kr

대수층에서의 수리경사는 위치수두(elevation head)의 차이에 의해 수리경사의 크기와 방향이 결정된다. 일반적인 토양층은 대부분이 자유면 대수층에 해당되며, 지형의 표고와 지하수위의 상관성이 매우 높다(Chung et al., 1999; Shim et al., 2000). 그러나, 매립지에서는 현재의 지형보다는 매립 이전의 지형에 의한 수리경사 방향으로 지하수 유동이 발생하게 된다(Son, 2007).

지하수 유동은 주 흐름 방향(major flow direction)과 수리경사(hydraulic gradient)에 의해 정의될 수 있으며, 현장에서 측정된 지하수위 자료를 이용하여 산정될 수 있다(Abriola and Pinder, 1982). 일반적으로 대수층의 불균질·이방성으로 인해 지하수의 주 흐름 방향을 정하고 수리경사를 산정하는 것은 어려운 일이지만, 대수층을 대표할 수 있는 주 흐름 방향에 대한 수리경사는 하나의 값으로 산정할 수 있다(Silliman and Frost, 1998). Pinder et al.(1989)은 지하수위 자료들을 통하여 수리경사를 산정하는 2차원 방정식을 제안하였고, Abriola and Pinder(1982)에 의해 3차원 방정식이 개발되었으며, 전산프로그램에 의한 수리경사 산정 연구는 Kelly and Bogardi(1989)에 의하여 시작되었다. 이러한 연구들은 Devlin(2003)에 의하여 정립되고 발전되었으며, 연구지역 내에 개발된 지하수공의 개수가 많고 분포가 좋을수록 신뢰성이 높은 지하수 주 흐름 방향이 산정될 수 있다(Devlin and McElwee, 2007).

본 연구에서는 부경대학교 환경연구동(17호관) 앞 잔디밭에 개발된 9개의 지하수공 내 지하수위 자료를 이용하여 지하수의 수리경사와 주 흐름 방향을 산정하였다. 본 연구에서는 정방형(1개), 삼각형(4개) 및 직사각형(4개) 평면을 설정하여 수리경사와 주 흐름 방향을 산정하였으며, 3가지 평면의 형태에 따른 수리경사와 주 흐름 방향의 차이를 확인하였다.

## 2. 지하수위 관측

연구부지는 수영만에 넓게 분포하는 충적층에 해당되며, 기반암은 산성화산암류에 속하는 구과상 유문암(spherulite rhyolite)이 분포하는 것으로 확인되었다(김태영 외, 2009). 본 연구부지 내에 개발된 지하수공 중 BH5공과 BH10공에서만 획득된 시추코아 자료에 의하면, 최상부의 매립토층(두께 5.2~5.5 m), 모래층(두께 1.8~2.1 m), 자갈 섞인 점토층(두께 0.9~1.2 m) 및 풍화토층(두께 11.5~12.8 m)의 순으로 퇴적되어 있었다(김태영 외, 2009).

본 연구는 부경대학교 환경연구동(17호관) 정면의 잔디밭 내 4 m × 4 m 규모에 정방형으로 설계된 지하수공을 이용하여 수행되었다. 연구부지 내 지하수공은 총 9개공이었으며, 지하수공 사이의 간격은 2 m로서 동일하게 설계되었다. 수리경사와 주 흐름 방향 산정을 위한 연구부지 평면의 형태별 분류는 9개공 모두를 이용한 정방형 평면(TW), 6개공을 이용한 4가지 경우의 삼각형 평면(T1, T2, T3 및 T4), 6개공을 이용한 4가지 경우의 직사각형 평면(R1, R2, R3 및 R4)으로 가정하였다(Fig. 1).

본 연구부지 내 9개 공에서 2007년 10월 18일부터 11월 1일 기간 중 12일(10월 21일, 28일은 측정 못함)에 걸쳐 24회 동안 지하수위(해수면기준, 표고는 3.5 m로서 동일) 관측이 수행되었다. 지하수공별 평균 지하수위는 BH1공과 BH7공이 1.389 m로서 높았으며, BH6공은 1.240 m로서 가장 낮았다. 따라서 연구부지 내 관측지점별 평균 지하수위의 최대 차이는 0.149 m 정도인 것으로 나타났으며, 지하수위만을 고려한 연구부지 내 지하수 유동은 동쪽에서 서쪽 방향으로 형성되어 있을 것으로 추정된다. 지하수위 관측 2일 전인 10월 16일에는 소량(1.5 mm)의 강우가 내렸으며, 관측기간 중에는 10월 26일에 12.0 mm의 강우가 발생하였다.

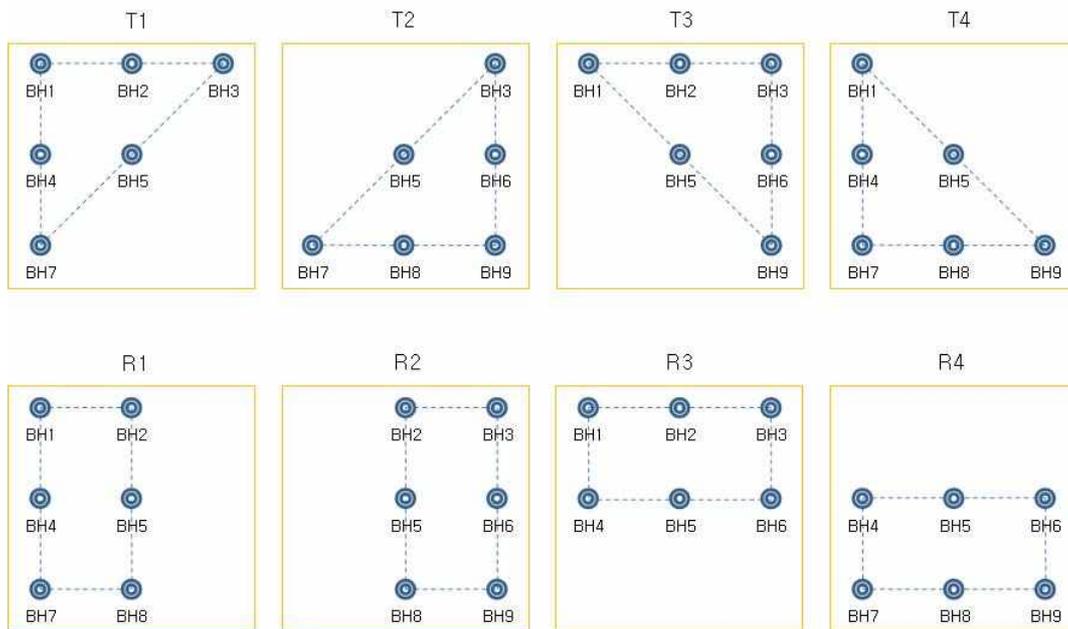


Fig. 1. Diagrams of groundwater wells with plane types in the study site.

### 3. 수리경사/주 흐름 방향 산정 분석

#### 3.1. 기본 이론

본 연구에서는 Devlin(2003)에 의해 제시된 대수층의 수리경사와 주 흐름 방향 산정 방법이 적용되었다. 동일 대수층에서 측정된 지하수면(groundwater table)이 평면 이라는 가정 하에서 x, y, z 축을 지나는 평면방정식은 식 (1)과 같다.

$$Ax + By + Cz - D = 0 \quad (1)$$

식 (1)로 표현되는 평면을 지하수면으로 가정한다면, x와 y 는 지하수공의 좌표를 나타내며 z 는 그 지점의 지하수위가 된다(Fig. 2(a)). 따라서 Fig. 2(b)를 이용하여 기하학적인 방법으로 수리경사의 크기와 방향을 해석한 결과, 식 (2)와 (3)으로 표현된다.

$$\text{Magnitude of hydraulic gradient} = \sqrt{\frac{A^2 + B^2}{C^2}} \quad (2)$$

$$\text{Direction of hydraulic gradient} = \arctan \frac{B}{A} \quad (3)$$

식 (1)에서 n개 자료에 대한 x, y, z 값을 행렬  $[X](n \times 3)$ , 계수 A, B, C 값을 행렬  $[A](3 \times 1)$ , 계수 D 값을 행렬  $[D](n \times 1)$ 라고 할 때, 행렬  $[A]$ 에 관하여 정리하면 식 (4)와 같다.

$$[A] = ([X]^t [X])^{-1} [X]^t [D] \quad (4)$$

여기서,  $t$ 는 전치행렬(transposed matrix)이고,  $[X]^{-1}$ 은  $[X]$ 의 역행렬(inverse matrix)이다. 행렬  $[D]$  내의 D 값들은 평면이 모두 평행하다는 가정 하에서 동일한 경사를 가지므로, 임의의 동일한 D를 선정할 수 있다. 식 (4)는 병렬식 선형회귀방정식이며, 가장 적합한 최소제곱방정식의 형태로 유도될 수 있다. 따라서, 산정된 계수 A, B, C는 지하수위 자료를 이용하여 가장 적합한 평면의 계수가 된다.

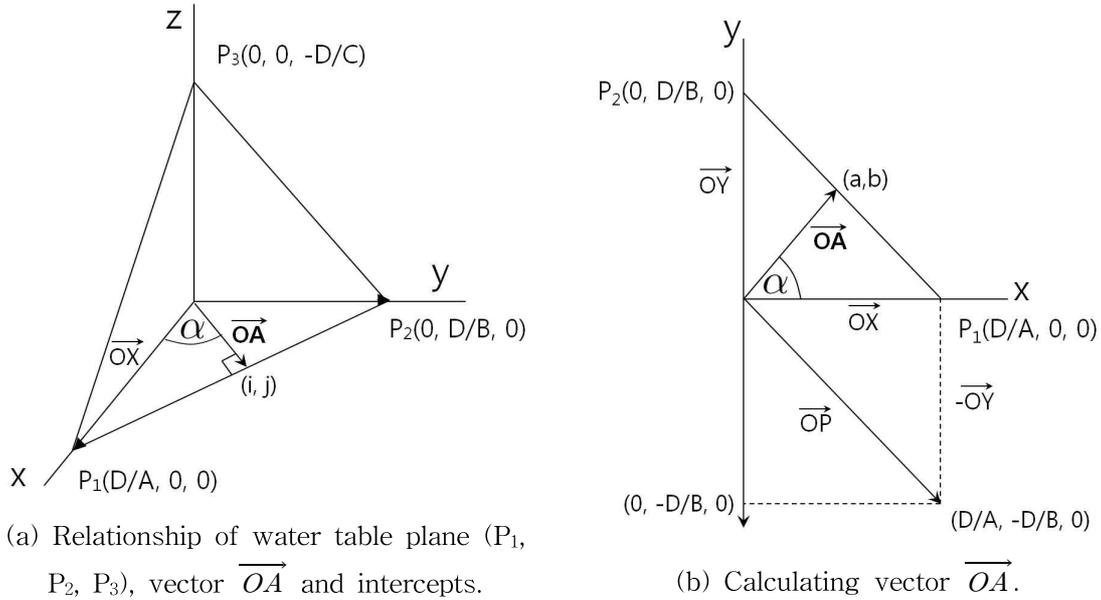


Fig. 2. Schematic diagram for estimate of hydraulic gradient (modified by Devlin(2003)).

### 3.2. 수리경사와 주 흐름 방향

지하수위 자료에 의해 산정된 9가지 평면의 수리경사와 주 흐름 방향의 최소, 최대, 범위, 평균 및 분산 값들이 Table 1에 정리되어 있다. 지하수의 수리경사와 주 흐름 방향은 BH1공을 기준으로 하여 x축은 남북 방향, y축은 동서 방향으로 가정하여 산정되었다(Fig. 1 참조). 지하수 주 흐름 방향은 BH1-BH4-BH7공 라인을 기준 축으로 설정하여 표기하였다. 따라서 산정된 지하수 주 흐름 방향이  $0^\circ$ 인 경우에는 남에서 북쪽 방향으로,  $90^\circ$ 인 경우에는 동에서 서쪽 방향으로 흐름이 형성되어 있음을 의미한다.

관측기간 동안 9개공의 지하수위를 이용하여 산정된 수리경사는 0.0107~0.0110의 범위이고 분산은 0 으로서 변동이 거의 없었으며, 평균은 0.0109 이었다. 지하수의 주 흐름 방향의 변동범위는 2.5646 정도로 산정되었으며, 그 평균은 85.8405 로서 지하수의 흐름이 동에서 서쪽 방향으로 형성되어 있음을 알 수 있다.

삼각형으로 설정된 4개 평면의 수리경사 최소값은 0.0096~0.0120, 최대값은 0.0103~0.0127, 평균은 0.0099~0.0123 이며, 분산은 모두 0 으로 산정되었다. 지하수 주 흐름 방향은 T2와 T4 평면에서는 동에서 서쪽 방향으로, T1과 T3 평면에서는 서에서 동쪽 방향으로 형성된 것으로 나타났다. 지하수위 자료와 다른 평면들을 고려한다면, T1과 T3 평면에서 산정된 지하수 주 흐름 방향은 현실적이지 못한 것으로 판단된다. 향후 연구에서는 이러한 오차원인을 밝히고, 수정 보완할 수 있도록 할 계획이다.

직사각형으로 설정된 4개 평면의 수리경사 최소값은 0.0089~0.0123, 최대값은 0.0097~0.0129, 평균은 0.0094~0.0126 이며, 분산은 모두 0 으로 산정되었다. 지하수 주 흐름 방향은 82.8724~85.7491의 범위 내에서 형성되어 있으며, 4개 평면 모두 지하수의 흐름이 동에서 서쪽 방향으로 형성되어 있다. 전체 평면에서의 지하수 주 흐름 방향에 비해서는  $3^\circ$  이내에서 북쪽 방향으로 형성되어 있음을 알 수 있다.

Table 1. General statistics of the hydraulic gradient and major flow direction

Plane Types		Number of Well	Minium	Maximum	Range	Average	Variance
TW	gradient	9	0.0107	0.0110	0.0004	0.0109	0.0000
	alpha		84.6824	87.2470	2.5646	85.8405	0.3362
T1	gradient	6	0.0096	0.0103	0.0007	0.0099	0.0000
	alpha		-86.8454	-83.5076	3.3378	-84.9818	0.4148
T2	gradient	6	0.0120	0.0127	0.0007	0.0123	0.0000
	alpha		79.3816	82.4518	3.0703	80.7219	0.3595
T3	gradient	6	0.0117	0.0123	0.0005	0.0120	0.0000
	alpha		-87.7523	-84.0825	3.6698	-86.2487	0.7059
T4	gradient	6	0.0098	0.0104	0.0006	0.0101	0.0000
	alpha		78.8137	80.7523	1.9386	79.7045	0.3136
R1	gradient	6	0.0123	0.0129	0.0005	0.0126	0.0000
	alpha		83.6671	86.7767	3.1096	84.9619	0.3208
R2	gradient	6	0.0089	0.0097	0.0007	0.0094	0.0000
	alpha		81.2744	85.4240	4.1496	82.8724	0.7802
R3	gradient	6	0.0105	0.0109	0.0005	0.0107	0.0000
	alpha		81.2053	87.6501	6.4448	84.8147	1.5723
R4	gradient	6	0.0105	0.0110	0.0005	0.0107	0.0000
	alpha		84.1494	87.2743	3.1249	85.7491	0.7055

### 참 고 문 헌

1. Chung, S. Y., Yoo, I. K., Yoon, M. J., Kweon, H. W., Heo, S. H., 1999, Application of geostatistical methods to groundwater flow analysis in a heterogeneous anisotropic aquifer, *Journal of Engineering Geology*, 9, 147-159.
2. Shim, B. O., Chung, S. Y., Kang, D. H., Kim, G. B., Park, H. Y., 2000, Geostatistical analysis for the groundwater database of the Youngsan and Sumjin river basins, *Journal of Engineering Geology*, 10, 131-142.
3. Son, J. H., 2007, The remediation and natural attenuation of oil contaminated soils considering the site characterization at Munhyeon-dong, Busan, Ph. D. Dissertation, Dept. of Environmental Geosciences, Pukyong National University, Busan.
4. Abriola, L. M., Pinder, G. F., 1982, Calculation of velocity in three space dimensions from hydraulic head measurement. *Ground Water*, 20, 205-213.
5. Silliman, S. E., Frost, C., 1998, Monitoring hydraulic gradient using three-point estimator, *Journal of Environmental Engineering*, 124, 517-523.
6. Pinder, G. F., Celia, M., Gray, W. G., 1981, Velocity calculation from randomly located hydraulic heads. *Ground Water*, 19, 262-264.
7. Kelly, W. E., Bogardi, I., 1989, Flow direction with a spreadsheet, *Ground water*, 27, 245-247.
8. Devlin, J. F., 2003, A spreadsheet method of estimating best-fit hydraulic gradients using head data from multiple wells, *Ground Water*, 41, 316-320.
9. Devlin, J. F., McElwee, C. D., 2007, Effects of Measurement Error on Horizontal Hydraulic Gradient Estimates, *Ground Water*, 45, 62-73.