

매립지 토양층의 수리경사와 주 흐름 방향의 변동특성

김태영 · 강동환* · 김성수* · 권병혁**

(주)지오그린21, *부경대학교 환경지질학과, **부경대학교 환경대기학과
(2008년 9월 15일 접수; 2008년 10월 20일 수정; 2009년 1월 21일 채택)

Variation Characteristics of Hydraulic Gradient and Major Flow Direction in the Landfill Soils

Tae-Yeong Kim, Dong-Hwan Kang*, Sung-Soo Kim* and Byung-Hyuk Kwon**

GeoGreen21 Co., Ltd., Seoul 152-719, Korea

**Department of Environmental Geosciences, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea*

***Department of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea*

(Manuscript received 15 September, 2008; revised 20 October, 2008; accepted 21 January, 2009)

Abstract

Hydraulic gradient of the landfill soils is estimated by Devlin (2003) method, and its variation characteristics from rainfall and permeability of the aquifer material are analyzed. The study site of 18 m × 12 m is located in front of the Environment Research Center at the Pukyong National University, and core logging, slug/bail test and groundwater monitoring was performed. The slug/bail tests were performed in 9 wells (except BH9 well), and drawdown data with elapsed time for bail tests were analyzed using Bouwer-Rice and Hvorslev methods. The average hydraulic conductivity estimated in each of the test wells was ranged $1.991 \times 10^{-7} \sim 4.714 \times 10^{-6}$ m/sec, and the average hydraulic conductivity in the study site was estimated 2.376×10^{-6} m/sec for arithmetic average, 1.655×10^{-6} m/sec for geometric average and 9.366×10^{-7} m/sec for harmonic average. The permeability of landfill soils was higher at the east side of the study site than at the west side. Groundwater level in 10 wells was monitored 44 times from October 2 to November 7, 2007. The groundwater level was ranged 1.187~1.610 m, and the average groundwater level range in each of the well showed 1.256~1.407 m. The groundwater level was higher at the east side than at the west side of the study site, and this distribution is identify to it of hydraulic conductivity. The hydraulic gradient and the major flow direction for 10 wells were estimated 0.0072~0.0093 and 81.7618~88.0836°, respectively. Also, the hydraulic gradient and the major flow direction for 9 wells were estimated 0.0102~0.0124 and 84.6822~89.1174°, respectively. The hydraulic gradient of the study site increased from rainfall (83.5 mm) on October 7, causing by that the groundwater level of the site with high permeability was higher. The hydraulic gradient estimated on and after October 16 was stable, due to almost no rainfall. Thus, it was confirmed that the variation of the hydraulic gradient in the landfill soils was controlled by the rainfall.

Key Words : Landfill soils, Hydraulic conductivity, Groundwater level, Rainfall, Hydraulic gradient, Major flow direction

1. 서론

지하수 유동은 지하수위의 차이에 의한 수리경사(hydraulic gradient)에 의해 발생한다. 자유면 대수층에서의 수리경사는 위치수두(elevation head)의 차이에 의해 수리경사의 크기와 방향이 결정된다. 일반적인 토양층은 대부분 자유면 대수층에 해당되며, 지형의 표고와 지하수위의 상관성이 매우 높다^{1,2)}. 그러나, 매립지에서는 현재의 지형보다는 매립 이전의 지형에 의한 수리경사 방향으로 지하수 유동이 발생하게 된다³⁾.

지하수 유동 분석을 위한 지하수위 분포도의 작성은 수치모델링(numerical modeling)에 의해 작성되어졌으나, 수치모델링은 지형과 지질의 변화가 단순하고 대수층 조건이 매우 이상적인 환경에서만 그 신뢰성이 높다⁴⁾. 이에, 지형적 기복이 심하며 불균질·이방성 대수층에서의 지하수위 분포도 작성에는 지구통계기법(geostatistical method)이 많이 이용되고 있다^{1,2)}. 지하수위 분포도 작성을 위해, 가장 널리 적용되고 있는 지구통계기법인 크리깅(kriging)은 최선의 선형불편 산정자(best linear unbiased estimator; BLUE)로서 불편(unbiased) 조건과 최소산정분산(minimum estimate variance)을 가지며 자료가 필요한 지점의 값들을 산정해내는 통계기법이다⁵⁾. 크리깅에 의한 지하수위 분포도는 이상치에 의해 과대산정 혹은 과소산정되어 평활화 효과(smoothing effect)에 의한 오차를 가지게 된다⁶⁾. 이와 같이 지하수 유동을 묘사하기 위해 다양한 방법으로 지하수위 분포도가 작성되고 있으나, 지하수 유동의 방향과 크기에 대한 정량화는 현장시험을 통한 수리상수(수리전도도, 공극율 등)의 산정, 관측공 내 유량유속 측정 및 지하수위 관측에 의한 수리경사의 산정을 통해서 정확하게 나타낼 수 있다.

지하수 유동은 주 흐름 방향(major flow direction)과 수리경사(hydraulic gradient)에 의해 정의될 수 있으며, 현장에서 측정된 지하수위 자료를 이용하여 산정될 수 있다⁷⁾. 일반적으로 대수층의 불균질·이방성으로 인해 지하수의 주 흐름 방향을 정하고 수리경사를 산정하는 것은 어려운 일이지만⁸⁾, 대수층을 대표할 수 있는 주 흐름 방향에 대한 수리경사는 하나의 값으로 산정할 수 있다⁹⁾. Pinder 등¹⁰⁾은 지하

수위 자료들을 통하여 수리경사를 산정하는 2차원 방정식을 제안하였고, Abriola와 Pinder⁷⁾에 의해 3차원 방정식이 개발되었다. 전산프로그램에 의한 수리경사 산정 연구는 Kelly와 Bogardi¹¹⁾에 의하여 시작되었다. 그리고 Devlin¹²⁾에 의하여 정립되고 발전되었으며, 연구지역 내에 개발된 지하수공의 개수가 많고, 분포가 좋을수록 신뢰성이 높은 지하수 주 흐름 방향이 산정될 수 있다¹³⁾.

본 연구에서는 부경대학교 환경연구동 앞 잔디밭에 개발된 10개의 지하수공 내 지하수위 자료를 이용하여 지하수의 수리경사와 주 흐름 방향을 산정하였다. 그리고, 연구부지 내 지하수의 수리경사와 주 흐름 방향에 대한 강우와 투수성의 영향에 대해 연구하였다.

2. 연구부지의 수리지질특성

2.1. 시추 조사

본 연구는 부경대학교 환경연구동(17호관) 정면의 잔디밭 내 18 m × 12 m 규모의 부지에서 수행되었다(Fig. 1). 연구부지는 과거 바다에 인접한 해성퇴적층이었으나, 1970년대에 용호만을 매립한 후 부경대학교 부지로 이용되고 있는 곳이다. 광역지질은 중생대 백악기의 경상누층군에 속하는 화산암 복합체인 유천층군을 구성하는 안산암질 화산각력암, 안산암 및 암회색 응회질퇴적암 등이 넓게 분포하고 있다. 또한, 후기에 이를 관입한 불국사 화성관입체에 해당되는 반려암, 각섬석화강섬록암 등이

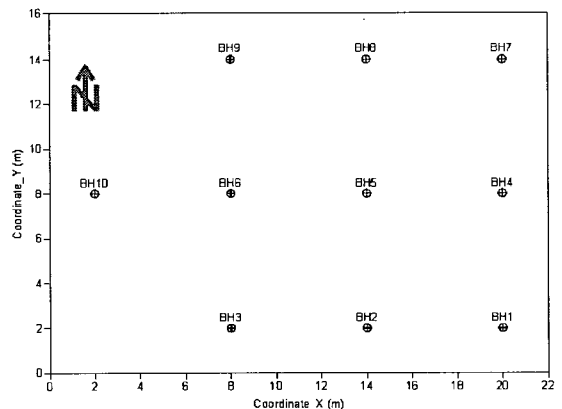


Fig. 1. Foreground of the study site and location map of the groundwater wells.

분포하고, 제4기의 충적층이 부정합으로 피복하여 넓게 분포한다. 연구부지는 수영만에 넓게 분포하는 충적층에 해당되며, 시추조사에 의해 기반암은 산성 화산암류에 속하는 구과상유문암(spherulite rhyolite)이 분포하는 것으로 확인되었다¹⁴⁾.

본 연구부지 내에 개발된 10개 지하수공 중 시추코어는 BH-5공과 BH-10공에서만 획득되었으며, 2개 공의 시추코어 자료를 바탕으로 토양주상도를 작성하였다(Fig. 2). 연구부지 내 BH-5공과 BH-10공의 수직적인 토양주상도에 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. 연구부지 내에서의 암반층은 지표면하 20 m 이상의 심도에 형성되어 있었다.

매립토층은 과거 해안매립을 위한 인위적인 매립과 성토에 의해 형성되었으며, 점토와 모래 및 자갈의 혼합층이며 주로 자갈질점토 혹은 자갈질모래로 분포한다. 매립토층의 하부에 위치한 모래층은 해성기원의 미고결 퇴적토층으로서 쾌각편이 다량 함유된 세립질 모래로 구성되어 있으며, 입도분포는 불량하고 분급 상태는 양호한 편이다. 모래층의 하

부에 위치한 자갈질 점토층은 풍화대에 자갈이 혼입된 층으로서 매립 이전의 표토층이다. 모래층의 하부에 위치한 풍화토층은 기반암인 구과상유문암의 풍화물로서 점토화 되어있으며, 비풍화된 자갈들이 잔존하고 있다.

2.2. 순간충격시험

연구부지의 토양층 내 수리전도도의 분포를 파악하기 위해, BH9공을 제외한 9개 지하수공에서 순간충격시험(slug/bail test)을 실시하였다. BH9공은 더미의 주입이 불가하여, 순간충격시험이 수행되지 못하였다. 순간충격시험은 주입시험(slug test)과 회수시험(bail test)의 두 단계로 실시되었다. 본 연구에서는 순간충격시험 중 회수시험에 의한 자료만을 이용하여 시험공 주변 토양층의 수리전도도를 산정하였다. 순간충격시험이 수행된 9개 공의 케이싱 내경은 0.025 m, 굴착심도는 19.0~25.3 m, 지표면하 지하수심도는 1.963~2.125 m 정도이었다.

시험부지 내 9개 공에서 실시된 순간충격시험에 의해 산정된 수리전도도가 Table 1에 정리되어 있다. 순간충격시험의 해석은 AQTESOLV 3.5 프로그램이 이용되었으며, 본 시험 조건에 가장 높은 적합도(fitness)를 나타낸 Bouwer & Rice 및 Hvorslev 해석법이 적용되었다. 시험대수층은 자유면 대수층으로 가정하였으며, 더미 회수 후 경과시간에 따른 수위변동을 입력하였다. 시험부지 내에서 회수시험에 의해 산정된 시험공별 평균 수리전도도의 범위는

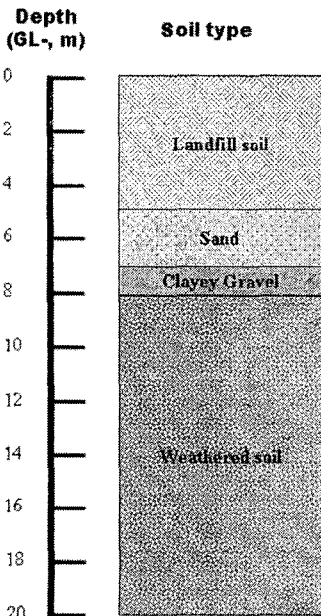


Fig. 2. Soil stratigraphic sections in the study site.

Table 1. Hydraulic conductivity estimated by Bouwer-Rice and Hvorslev methods using bail test data (unit: m/sec)

Well No.	Hydraulic conductivity		
	Bouwer-Rice method	Hvorslev method	Well average
BH1	3.829E-06	5.424E-06	4.627E-06
BH2	1.261E-06	1.777E-06	1.519E-06
BH3	6.479E-07	9.199E-07	7.839E-07
BH4	3.897E-06	5.531E-06	4.714E-06
BH5	8.997E-07	1.275E-06	1.087E-06
BH6	1.645E-07	2.337E-07	1.991E-07
BH7	2.215E-06	3.146E-06	2.681E-06
BH8	3.594E-06	5.100E-06	4.347E-06
BH10	1.178E-06	1.672E-06	1.425E-06
Arithmetic mean			2.376E-06

1.991×10⁻⁷~4.714×10⁻⁶ m/sec 정도이었으며, 시험부지 전체의 산술평균(arithmetic mean) 수리전도도는 2.376×10⁻⁶ m/sec로 나타났다.

2.3. 지하수위 관측

본 연구부지 내 10개 공에서 2007년 10월 2일부터 11월 7일까지 44회의 지하수위(해수면기준) 측정

Table 2. Groundwater level data monitored in wells at the study site (unit: meter)

Measured Time (mm-dd-hh)	BH1	BH2	BH3	BH4	BH5	BH6	BH7	BH8	BH9	BH10
10-02-11	1.445	1.361	1.319	1.417	1.388	1.307	1.445	1.338	1.316	1.348
10-02-17	1.441	1.359	1.316	1.413	1.385	1.303	1.442	1.335	1.313	1.344
10-04-17	1.421	1.338	1.295	1.392	1.364	1.280	1.419	1.312	1.291	1.320
10-05-09	1.411	1.329	1.284	1.382	1.355	1.268	1.411	1.303	1.278	1.309
10-05-17	1.412	1.329	1.284	1.382	1.355	1.269	1.411	1.303	1.279	1.310
10-08-09	1.549	1.466	1.415	1.521	1.493	1.387	1.555	1.445	1.420	1.425
10-08-17	1.594	1.510	1.451	1.565	1.536	1.423	1.594	1.482	1.455	1.464
10-09-09	1.609	1.528	1.470	1.581	1.554	1.454	1.610	1.499	1.476	1.492
10-15-10	1.421	1.338	1.275	1.392	1.365	1.233	1.422	1.310	1.284	1.290
10-15-17	1.428	1.345	1.283	1.400	1.372	1.253	1.428	1.322	1.294	1.306
10-16-09	1.430	1.347	1.294	1.402	1.373	1.269	1.430	1.322	1.296	1.314
10-16-17	1.431	1.348	1.300	1.402	1.375	1.276	1.431	1.324	1.299	1.320
10-17-09	1.433	1.350	1.301	1.405	1.377	1.280	1.434	1.344	1.301	1.323
10-17-17	1.436	1.353	1.303	1.408	1.379	1.285	1.437	1.329	1.306	1.328
10-18-09	1.427	1.334	1.295	1.400	1.371	1.278	1.426	1.319	1.294	1.320
10-18-17	1.430	1.347	1.301	1.402	1.374	1.280	1.430	1.321	1.299	1.324
10-19-09	1.435	1.350	1.305	1.406	1.377	1.286	1.434	1.324	1.302	1.330
10-19-17	1.433	1.349	1.303	1.404	1.376	1.285	1.434	1.325	1.301	1.330
10-20-09	1.415	1.330	1.283	1.388	1.357	1.267	1.415	1.305	1.282	1.309
10-20-17	1.414	1.330	1.283	1.386	1.357	1.267	1.413	1.304	1.282	1.309
10-22-09	1.398	1.315	1.265	1.370	1.341	1.250	1.398	1.289	1.263	1.292
10-22-17	1.399	1.316	1.266	1.372	1.342	1.253	1.401	1.291	1.264	1.295
10-23-09	1.386	1.302	1.252	1.359	1.330	1.237	1.387	1.277	1.250	1.276
10-23-17	1.385	1.300	1.251	1.358	1.327	1.235	1.386	1.275	1.248	1.275
10-24-09	1.378	1.295	1.244	1.350	1.322	1.230	1.378	1.269	1.242	1.269
10-24-17	1.376	1.293	1.243	1.349	1.320	1.228	1.377	1.268	1.240	1.267
10-25-09	1.380	1.297	1.245	1.352	1.324	1.233	1.380	1.270	1.244	1.273
10-25-17	1.387	1.304	1.254	1.358	1.329	1.237	1.388	1.277	1.251	1.282
10-26-09	1.389	1.306	1.256	1.361	1.332	1.241	1.390	1.280	1.255	1.283
10-26-17	1.389	1.306	1.256	1.362	1.332	1.242	1.391	1.281	1.255	1.284
10-27-09	1.387	1.303	1.254	1.360	1.330	1.238	1.388	1.278	1.253	1.280
10-27-17	1.387	1.302	1.253	1.358	1.328	1.238	1.387	1.278	1.251	1.280
10-29-09	1.366	1.281	1.231	1.339	1.308	1.217	1.367	1.256	1.234	1.261
10-29-17	1.364	1.278	1.227	1.338	1.306	1.214	1.364	1.253	1.232	1.257
10-30-09	1.357	1.271	1.222	1.328	1.297	1.206	1.357	1.246	1.219	1.244
10-31-09	1.355	1.271	1.220	1.328	1.296	1.205	1.353	1.243	1.217	1.243
10-31-17	1.365	1.280	1.231	1.337	1.306	1.217	1.364	1.254	1.228	1.255
11-01-09	1.361	1.278	1.229	1.334	1.304	1.212	1.362	1.250	1.223	1.251
11-01-17	1.367	1.283	1.231	1.333	1.305	1.214	1.365	1.253	1.228	1.257
11-05-09	1.340	1.257	1.207	1.312	1.283	1.190	1.339	1.230	1.202	1.232
11-05-17	1.347	1.262	1.213	1.318	1.290	1.197	1.345	1.234	1.208	1.236
11-06-09	1.342	1.258	1.207	1.313	1.285	1.192	1.343	1.231	1.202	1.231
11-06-17	1.342	1.258	1.207	1.313	1.285	1.193	1.342	1.232	1.203	1.232
11-07-09	1.338	1.254	1.203	1.310	1.281	1.187	1.338	1.227	1.197	1.225

Table 3. General statistics for groundwater level data monitored in wells

Well No.	Range	Minimum	Maximum	Mean	Variance	Skewness	Kurtosis
BH1	0.271	1.338	1.609	1.407	0.003	1.954	4.807
BH2	0.274	1.254	1.528	1.323	0.003	1.959	4.839
BH3	0.267	1.203	1.470	1.273	0.003	1.790	4.099
BH4	0.271	1.310	1.581	1.379	0.003	1.948	4.797
BH5	0.273	1.281	1.554	1.350	0.003	1.933	4.718
BH6	0.267	1.187	1.454	1.256	0.003	1.830	4.346
BH7	0.272	1.338	1.610	1.407	0.003	1.950	4.758
BH8	0.272	1.227	1.499	1.298	0.003	1.825	4.219
BH9	0.279	1.197	1.476	1.272	0.004	1.780	4.120
BH10	0.267	1.225	1.492	1.298	0.003	1.694	3.912

이 수행되었다(Table 2). 지하수위 관측은 매일 아침 9시와 오후 5시에 수행되었으며, 10월 2일과 4일에는 수위측정기의 오류로 인해 정해진 시간에 측정되지 못하였다. 연구부지 내 지하수위는 지표면하 지하수 심도를 수동수위측정기(KL010, OTT)로 측정하고, 이 자료와 표고를 이용하여 해수면기준 지하수위로 환산하였다. 지하수공에서 관측된 지하수위의 범위, 평균, 왜도 및 첨도 등이 Table 3에 정리되어 있다. 지하수위 관측 기간 중 2007년 10월 7일부터 9일 사이의 강우량은 105.5 mm 이었으며, 10월 16일과 26일에는 각각 1.5 mm와 12.0 mm 정도의 강우가 발생하였다(Table 4).

관측기간 동안 10개 지하수공 내 지하수위의 최대 변화폭은 0.267~0.279 m 정도로 나타났다. 이러한 변화폭은 관측시기가 전체적으로는 갈수기에 해당하므로 지하수위는 0.10~0.13 m 정도 하강하였으나, 2007년 10월 7일부터 9일 사이에 내린 집중적인 강우(105.5 mm)로 인해 연구부지 내 지하수위가 일시적으로 0.15 m 정도 상승하였기 때문이다. 지하수공별 평균 지하수위는 BH1공과 BH7공이 1.407 m로서 가장 높았으며, BH9공과 BH3공은 1.272 m와 1.273 m로서 낮았다. 따라서 연구부지 내 관측지점

별 지하수위의 평균적인 차이는 0.135 m 정도인 것으로 나타났으며, 표고가 해수면기준 3.5 m로서 동일한 연구부지에서 지하수위의 차이가 발생한 것은 매립 이전의 고지형에 의해 형성된 수리경사에 의한 것으로 판단된다.

3. 수리경사 변동분석

3.1. 기본 이론

본 연구에서는 Devlin¹²⁾에 의해 제시된 대수층의 수리경사와 주 흐름 방향 산정 방법이 적용되었다. 동일 대수층에서 측정된 지하수면(groundwater table)이 평면이라는 가정 하에서 x, y, z 축을 지나는 평면방정식은 식 (1)과 같다.

$$Ax + By + Cz - D = 0 \tag{1}$$

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

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

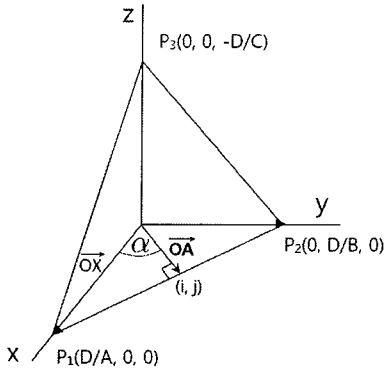
$$\text{Direction of hydraulic gradient} = \arctan \frac{B}{A} \tag{3}$$

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

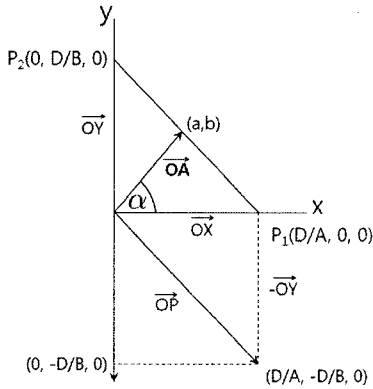
$$[A] = ([X]^t [X])^{-1} [X]^t [D] \tag{4}$$

Table 4. Rainfall data during the monitoring interval for groundwater level

Time	Rainfall (mm/day)
October 7, 2007	83.5
October 8, 2007	21.0
October 9, 2007	1.0
October 16, 2007	1.5
October 26, 2007	12.0



(a) Relationship of water table plane (P_1, P_2, P_3), vector \overrightarrow{OA} and intercepts.



(b) Calculating vector \overrightarrow{OA} .

Fig. 3. Schematic diagram for estimate of hydraulic gradient (modified by Devlin¹²⁾).

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 D 를 선정할 수 있다. 식 (4)는 병렬식 선형회귀방정식이며¹⁵⁾, 가장 적합한 최소제곱방정식의 형태로 유도될 수 있다¹⁶⁾. 따라서, 산정된 계수 A, B, C 는 지하수위 자료를 이용하여 가장 적합한 평면의 계수가 된다.

3.2. 수리경사 산정 및 주 흐름 방향

본 연구부지에서 관측된 지하수위 자료를 이용하여 Devlin¹²⁾의 방법으로 산정된 관측일자별 지하수의 수리경사와 주 흐름 방향이 Table 5에 정리되어 있다. 지하수의 수리경사와 주 흐름 방향은 BH1공

Table 5. Hydraulic gradient and major flow direction estimated by groundwater level data in the study site

Measured Time (Month-Day-Hour)	10 data		9 data	
	Hydraulic gradient	Major flow direction (°)	Hydraulic gradient	Major flow direction (°)
10-02-11	0.0072	83.0691	0.0102	85.7190
10-02-17	0.0072	83.0917	0.0102	85.7077
10-04-17	0.0073	81.9046	0.0103	84.7934
10-05-09	0.0075	82.0547	0.0105	84.9051
10-05-17	0.0075	82.0057	0.0104	84.8889
10-08-09	0.0086	87.3220	0.0112	88.3532
10-08-17	0.0090	84.9145	0.0118	86.5554
10-09-09	0.0083	84.8938	0.0112	86.6576
10-15-10	0.0093	85.8211	0.0124	87.3667
10-15-17	0.0088	86.7609	0.0119	88.1434
10-16-09	0.0083	84.5659	0.0113	86.5218
10-16-17	0.0080	83.9505	0.0109	86.1077
10-17-09	0.0080	88.0836	0.0109	89.1174
10-17-17	0.0078	84.8642	0.0108	86.8325
10-18-09	0.0078	85.3584	0.0108	87.2470
10-18-17	0.0077	83.1084	0.0107	85.5898
10-19-09	0.0077	82.6101	0.0107	85.2941
10-19-17	0.0076	83.6078	0.0107	86.0436
10-20-09	0.0078	83.5290	0.0108	85.9388
10-20-17	0.0077	83.0362	0.0107	85.5848
10-22-09	0.0078	83.1428	0.0108	85.6733
10-22-17	0.0078	83.7111	0.0109	86.1264
10-23-09	0.0080	83.7330	0.0110	86.0106
10-23-17	0.0080	83.5280	0.0110	85.8880
10-24-09	0.0079	83.2675	0.0109	85.6914
10-24-17	0.0080	83.4987	0.0109	85.8516
10-25-09	0.0079	83.1756	0.0109	85.6879
10-25-17	0.0078	82.8846	0.0109	85.5511
10-26-09	0.0078	83.5420	0.0108	85.9590
10-26-17	0.0078	83.9421	0.0109	86.2678
10-27-09	0.0079	83.7952	0.0109	86.1245
10-27-17	0.0078	83.5641	0.0109	85.9868
10-29-09	0.0078	84.4841	0.0109	86.6966
10-29-17	0.0079	84.7550	0.0110	86.8639
10-30-09	0.0081	83.3851	0.0110	85.7391
10-31-09	0.0081	82.3811	0.0110	85.0177
10-31-17	0.0079	82.8623	0.0109	85.4005
11-01-09	0.0080	82.3245	0.0110	84.9944
11-01-17	0.0079	81.7618	0.0110	84.6824
11-05-09	0.0079	82.1980	0.0110	84.9875
11-05-17	0.0080	81.8764	0.0110	84.6822
11-06-09	0.0081	82.7413	0.0111	85.3240
11-06-17	0.0080	82.8832	0.0110	85.4406
11-07-09	0.0082	82.4595	0.0112	85.0701

을 기준으로 하여 x축은 동서 방향, y축은 남북 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°인 경우에는 남에서 북쪽 방향으로, 90°인 경우에는 동에서 서쪽 방향으로 흐름이 형성되어 있음을 의미한다. 연구부지의 지하수 수리경사와 주 흐름 방향은 10개 지하수공 내 지하수위 자료를 모두 이용한 경우와 BH10공을 제외한 9개 공의 자료를 이용한 경우에 대해 각각 산정되었다. 이는 동일대수층의 지하수 수리경사와 주 흐름 방향 산정 시 정방형의 자료를 이용하면 오차를 줄일 수 있다는 연구¹³⁾에 의한 것으로서, 본 연구에서는 두 가지 경우의 결과를 비교 분석하였다. 연구부지 내 10개 공의 지하수위 자료를 이용하여 산정된 수리경사와 주 흐름 방향의 범위는 0.0072~0.0093 및 81.7618~88.0836° 이었으며, 9개 공의 지하수위 자료를 이용하여 산정된 수리경사와 주 흐름 방향은 0.0102~0.0124 및 84.6822~89.1174° 이었다. 수리경사의 변동 범위는 유사하였으나, 지하수 주 흐름 방향의 변동은 10개 공의 지하수위 자료를 이용한 경우에 더욱 크게 나타났다. 또한 10개 공의 지하수위 자료를 이용한 경우가 9개 공의 지하수위를 이용한 경우에 비해 수리경사가 0.003 정도 낮았으며, 이는 BH10공에서의 지하수위가 BH3, BH6 및 BH9공에 비해 높았기 때문이다.

지하수위 자료에 의해 산정된 수리경사와 주 흐름 방향에 대한 범위, 최소, 최대 및 평균값을 Table 6에 정리하였다. 수리경사의 범위는 유사하였으나 최소, 최대 및 평균값은 9개 자료만을 이용한 경우에 1.4배 정도 높았다. 이는 BH10공의 지하수위가 BH3, BH6 및 BH9공들에 비해 높았기 때문이다. 지하수 주 흐름 방향의 최소, 최대 및 평균값은 9개 공의 자료를 이용한 경우가 높았으나, 범위는 10개 공의 자료를 이용한 경우가 높게 나타났다.

Table 6. General statistics of the hydraulic gradient and major flow direction

Parameter	Number of well	Range	Minimum	Maximum	Mean
Hydraulic gradient	10	0.0021	0.0072	0.0093	0.0079
	9	0.0022	0.0102	0.0124	0.0109
Major flow direction (°)	10	6.3218	81.7618	88.0836	83.6466
	9	4.4352	84.6822	89.1174	85.9792

본 연구부지에서 산정된 지하수의 수리경사와 주 흐름 방향을 10월 1일을 기준으로 하여 경과시간별 변동그래프를 작성하였다. 경과시간별 수리경사의 변동그래프는 Fig. 4에 작성되어 있으며, 지하수 주 흐름 방향의 변동그래프는 Fig. 5와 같다. 연구부지 내 수리경사는 10월 7일에 내린 강우(83.5 mm)에 의해 0.001 정도 증가하였으며, 또한 10월 10일부터 12일 사이에 BH10공에서 수행된 양수(500 m³ 정도)에 의해 수리경사가 크게 증가하였다. 양수에 의한 수리경사의 변동영향은 10월 15일 이후부터 안정화되었으나, 지하수 주 흐름 방향은 10월 16일과 17일 사이에 약간의 변동을 나타내었으며 이는 10월 16일에 발생한 강우에 의한 것으로 판단된다. 관측기간 동안의 지하수 주 흐름 방향은 남동동에서 북서서 방향으로 형성되어 있었으며, 수리경사와 같이 강우와 양수에 의해 영향을 받고 있다. 강우와 양수가 발생하지 않은 10월 16일 이후의 지하수 주 흐름

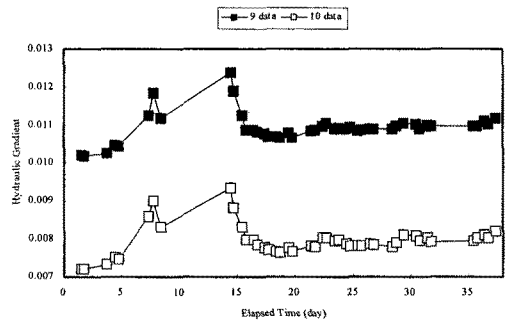


Fig. 4. Hydraulic gradient variation during groundwater level monitoring.

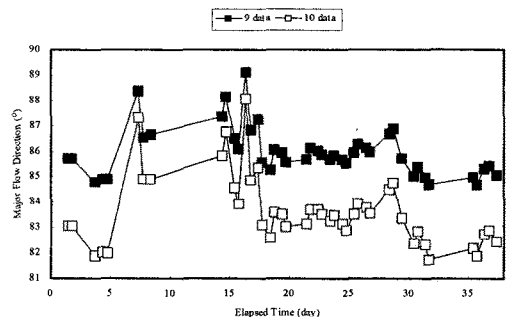


Fig. 5. Major flow direction variation during groundwater level monitoring.

방향은 84~87°(10개 공) 및 82~85°(9개 공)의 범위로 나타났다.

4. 고찰 및 결론

1. 연구부지 내에서 수행된 회수시험에 의해 산정된 시험공별 평균 수리전도도의 범위는 1.991×10^{-7} ~ 4.714×10^{-6} m/sec 이었으며, 부지의 평균 수리전도도는 산술평균 2.376×10^{-6} m/sec, 기하평균 1.655×10^{-6} m/sec 및 조화평균 9.366×10^{-7} m/sec로 산정되었다. 연구부지의 수리전도도는 BH1공, BH4공, BH7공 및 BH8공 토양층에서는 높았고, BH3공, BH6공 및 BH10공 토양층에서는 상대적으로 낮았다.

2. 연구부지 내 10개 공에서 2007년 10월 2일부터 11월 7일까지의 지하수위 관측기간 동안 최대 변화폭은 0.267~0.279 m 이었으며, 이는 관측시기가 전체적으로는 갈수기이어서 지하수위가 0.10~0.13 m 정도 하강하였으나 2007년 10월 7일부터 9일 사이에 내린 집중적인 강우(105.5 mm)로 인해 연구부지 내 지하수위가 일시적으로 0.15 m 정도 상승하였기 때문이다. 지하수공별 평균 지하수위는 BH1공과 BH7공이 1.407 m로서 가장 높았으며, BH9공 1.272 m와 BH3공 1.273 m로서 낮았다. 따라서, 본 연구부지에서는 지하수공별 지하수위와 수리전도도의 관계가 비례적임을 알 수 있다.

3. Devlin¹²⁾의 방법을 이용하여 산정된 지하수의 수리경사와 주 흐름 방향의 범위는 10개 공의 지하수위 자료에 의해서는 0.0072~0.0093 및 81.7618~88.0836°, 9개 공의 지하수위 자료에 의해서는 0.0102~0.0124 및 84.6822~89.1174° 정도이었다. 수리경사의 크기가 10개 공의 지하수위를 이용한 경우에 0.003 정도 낮았으며, 이는 BH10공에서의 지하수위가 BH3, BH6 및 BH9공에 비해 높았기 때문이다.

4. 본 연구부지 내 BH10공의 지하수위가 BH3, BH6 및 BH9공들에 비해 높게 형성되어 있었기 때문에, 일반통계분석에 의한 수리경사의 범위는 유사하였으나 최소, 최대 및 평균값은 9개 공의 지하수위 자료만을 이용한 경우가 1.4배 정도 높았다. 지하수 주 흐름 방향의 최대 변동폭은 10개 공의 지하수위 자료를 이용한 경우가 높았으며, 이는 BH10공

에 의해 지하수위 자료의 분포가 정방형을 이루지 못하여 왜곡되었기 때문이다.

5. 지하수위의 자료 개수에 관계없이 10월 7일에 내린 강우(83.5 mm)에 의해 연구부지 내 수리경사는 0.001 정도 증가하였으며, 주 흐름 방향도 3° 정도 변동되었다. 강우에 의한 영향이 거의 없었던 10월 16일 이후부터의 수리경사는 0.0076~0.0083(10개 공) 및 0.0107~0.0113(9개 공) 정도의 범위로서 안정화되었다. 그리고, 지하수 주 흐름 방향도 84~87°(10개 공) 및 82~85°(9개 공)의 범위로서 소폭의 변동을 나타내었다.

6. 본 연구부지에서는 지하수위가 높은 지역(BH1공, BH4공, BH7공 및 BH8공)에서 토양층의 수평 수리전도도 역시 높게 산정되었다. 일반적으로는 수평 수리전도도가 높은 토양층에서 수직 수리전도도가 높을 것으로 판단되며, 이로 인해 강우 발생 시의 지하수위 상승률이 높아 수리경사가 더욱 증가하게 될 것이다. 이러한 기작으로 인해 본 연구부지 내 강우 발생 시 지하수의 주 흐름 방향이 서쪽 방향으로 더욱 근접하여 형성되었으며, 이는 연구부지내 동쪽과 북쪽의 지하수위와 투수성이 높았기 때문인 것으로 추정할 수 있다.

7. 향후에는 강우와 대수층의 투수성을 포함한 다양한 요인들(지하수공의 배치, 관측 면적, 지하수공의 개수, 기준 지하수공의 위치 등)에 대한 민감도 분석을 수행하여 지하수의 수리경사와 주 흐름 방향의 변동특성에 대해 연구하고자 한다.

감사의 글

이 논문은 기상청 기상지진기술개발사업단(CATER 2006-2101)에 의하여 연구비가 지원되었으며, 지원기관에 감사드립니다.

참고 문헌

- 1) 정상용, 유인걸, 윤명재, 권해우, 허선희, 1999, 불균질·이방성 대수층의 지하수 유동분석에 지구통계기법의 응용, 대한지질공학회지, 9(2), 147-159.
- 2) 심병완, 정상용, 강동환, 김규범, 박희영, 2000, 영산강·섬진강 유역의 지하수 데이터베이스 자료에 대한 지구통계학적 분석, 대한지질공학회지, 10(2), 131-142.

- 3) 손주형, 2007, 부지특성을 고려한 부산 문현동 유류 오염 토양의 복원 및 자연저감에 관한 연구, 박사학위논문, 환경지질학과, 부경대학교, 부산.
- 4) Wang H. F., Anderson M. P., 1982, Introduction to groundwater modeling, W. H. Freeman and Company, 237pp.
- 5) 강동환, 1999, 부산 지하수 수질의 지구통계학적 분석, 석사학위논문, 응용지질학과, 부경대학교, 부산.
- 6) Marinoni O., 2003, Improving geological models using a combined ordinary-indicator kriging approach, *Engineering Geology*, 69, 37-45.
- 7) Abriola L. M., Pinder G. F., 1982, Calculation of velocity in three space dimensions from hydraulic head measurement. *Ground Water*, 20, 205-213.
- 8) Cole B. E., Silliman S. E., 1996, Estimating the horizontal gradient in heterogeneous, unconfined aquifers: Comparison of three-point schemes, *Ground Water Monitoring and Remediation*, 16, 84-91.
- 9) Silliman S. E., Frost C., 1998, Monitoring hydraulic gradient using three-point estimator, *Journal of Environmental Engineering*, 124, 517-523.
- 10) Pinder G. F., Celia M., Gray W. G., 1981, Velocity calculation from randomly located hydraulic heads. *Ground Water*, 19, 262-264.
- 11) Kelly W. E., Bogardi I., 1989, Flow direction with a spreadsheet, *Ground water*, 27, 245-247.
- 12) Devlin J. F., 2003, A spreadsheet method of estimating best-fit hydraulic gradients using head data from multiple wells, *Ground Water*, 41, 316-320.
- 13) Devlin J. F., McElwee C. D., 2007, Effects of Measurement Error on Horizontal Hydraulic Gradient Estimates, *Ground Water*, 45, 62-73.
- 14) 손치무, 이상만, 김영기, 김상욱, 김형식, 1978, 한국 지질도: 동래·월내도폭, 자원개발연구소, 27pp.
- 15) Snedecor G. W., Cochran W. G., 1989, Statistical method, 8th ed., Ames, Iowa: Iowa State Press, 503pp.
- 16) Hornbeck R. W., 1975, Numerical methods, QUANTUM, 320pp.