

층적층 토질 특성을 고려한 강변여과수 수평집수관의 산출량 추정

김태형¹ · 이치형² · 이준학² · 오동환² · 김규범^{3,*}

¹K-water연구원

²(주)인텔리지오

³대전대학교 건설안전방재공학과

요 약

강변여과수 산출량은 경험식에 의하여 추정 가능하나 국내의 퇴적 환경에 적합한 경험식은 개발되지 못하였다. 본 연구에서는, 안성천 강변여과수 시공시 확보된 수평집수관내 구간별 층적층 입도 특성(공극률(n), 통과율에 따른 입경(d_{10} , d_{15} , d_{20} , d_{30} , d_{40} , d_{50} , d_{60} , d_{70} , d_{85}), 균등계수(Cu), 곡률계수(Cc)), 추정 수리전도도(K) 및 개공률 등을 활용하여 수평집수관의 지하수 산출량 추정모형을 수립하였다. 분석결과, d_{70} 과 K 및 개공률로 설명되는 회귀모형이 실제 지하수 산출량을 가장 잘 모사하는 것으로 나타났다. 본 연구 결과는 안성천의 퇴적 특성에 국한된 결과이긴 하나, 시추조사 등 설계 단계에서 취득되는 다양한 지역의 조사 자료를 종합적으로 활용한다면 국내 적합한 강변여과수 산출량 추정식으로 발전될 수 있을 것이다.

주요어: 강변여과, 입도 분석, 수리전도도, 개공률, 산출량

Tae-Hyung Kim, Chi-Hyung Lee, Jun-Hak Lee, Dong-Hwan Oh and Gyoo-Bum Kim, 2016, Estimation of groundwater yield at a horizontal well using soil characteristics at riverbank filtration site. Journal of the Geological Society of Korea. v. 52, no. 3, p. 291-301

ABSTRACT: Groundwater yield at a riverbank filtration site can be estimated using existing empirical equations, but an optimal equation adequate to a depositional environment of Korea has not been developed yet. In this study, we developed multiple regression equations for yield estimation of horizontal wells at riverbank filtration site of Anseong stream. The results showed that the regression model composed of d_{70} , hydraulic conductivity (K), and open area of screen is adequate to estimate an actual yield. Though the study result is limited to a case of the Anseong stream, the method used in this study would be applied for yield estimation of riverbank filtration wells if adequate number of data collected from multiple locations is used for the analysis.

Key words: riverbank filtration, grain size analysis, hydraulic conductivity, open area, yield

(Tae-Hyung Kim, K-water Institute, Korea Water Resources Corporation, Daejeon 34045, Republic of Korea; Chi-Hyung Lee, Jun-Hak Lee and Dong-Hwan Oh, Intellego Co. Ltd., Seoul 08390, Republic of Korea; Gyoo-Bum Kim, Daejeon University, Daejeon 34520, Republic of Korea)

1. 서 론

직접취수 방식인 지표수는 수량 및 수질변화에 민감하지만, 간접취수 방식인 강변여과수(riverbank filtration)는 일정한 수량 및 수질을 유지하는 것으로 보고되고 있다. 국내에서 강변여과수 개발은 1990년대부터 연구되기 시작하였고, 대규모 개발 사업은 1998년 창원시 북면과 대산면 강변여과수 사업, 2004년 가평군

가평읍 자라섬 강변여과수 사업, 2005년 함안군 칠서면 강변여과수 사업, 2006년 김해시 탄성 강변여과수 개발 등이 추진된 바 있다. 또한 최근에는 창녕군 중산리 지역에서 대규모 강변여과수 개발 사업을 진행 중에 있다. 환경부 상수원관리규칙 제3조에 의하면 강변여과수는 하천, 호소 또는 그 인근지역의 사력층을 통과한 물이라고 정의하고 있다. 이와 같이 강변여과수는 천부의 하천수와 혼합된 지하수가 모래자갈층을

* Corresponding author: +82-42-280-4804, E-mail: geowater@dju.kr

통과하면서 느리게 이동하여 수질이 개선되므로 지표수의 수질 사고 및 고탁도 문제 등에 대응할 수 있는 장점을 갖고 있다(Kyunggi Research Institute, 2008; K-water, 2008). 한편, 4대강 살리기 사업 이후 하천 수위를 안정적으로 유지하는 것이 가능해져 수량적인 측면에서 강변여과수의 개발여건이 크게 향상되었고, 이에 따라 대용량 취수가 가능한 방사형집수정(Radial collector well)을 통한 강변여과수 개발이 관심 분야로 다시 부각되고 있다(Kim, G.B. *et al.*, 2014).

현재 국내에서 강변여과수의 조사, 분석에 대한 논문 및 연구성과는 많이 보고되었지만, 최적 설계 및 시공 기술 관련 연구는 아직 미비한 실정이다. 강변층적층의 토질 특성을 고려한 강변여과수 개발 시 설계지침 마련을 위한 수행 연구로는 대수층의 수리전도도와 방사형집수정의 수평집수관에서 산출되는 유량과의 상관성 연구(Kim, T.H. *et al.*, 2014), 수평집수관의 굴착 시 속도 추정 연구(Kim *et al.*, 2015), 방사형집수정의 수평집수관 여재팩 및 스크린 설계에 관한 연구(Lee *et al.*, 2015) 등으로 제한적이다.

본 연구에서는 안성천 강변여과수 개발시 수평집수관에서 채취한 층적층의 시료를 이용하여 입도분석을 실시하고, 수리전도도 추정 자료 및 스크린 설

계 자료를 활용하여 수평집수관에서의 지하수 산출량을 추정하는 경험식을 제안하고자 하였다.

2. 연구지역

연구지역은 경기도 안성천 일원의 강변층적층으로 방사형집수정 설치 위치는 행정구역상 천안시로 안성시와 평택시가 인접한 지역이다(그림 1). 연구지역의 기반암은 선캠브리아기의 흑운모편마암과 이를 관입한 쥐라기의 흑운모화강암으로 구성되어 있고, 이들 기반암 상부에 강변층적층이 분포하고 있다. 층적층의 두께는 약 6.0~9.9 m로서, 하부로부터 풍화토, 자갈질 모래, 실트질 모래, 점토질 실트로 구성되어 있다(그림 2). 시추공에 대한 현장 투수 시험 결과, 하부 자갈질 모래의 수리전도도는 1.06×10^{-1} cm/sec 내지 1.24×10^{-0} cm/sec, 상부 실트질 모래 및 점토질 실트의 경우에는 2.20×10^{-3} cm/sec 내지 2.12×10^{-0} cm/sec의 범위를 나타내며, 층적층의 평균 수리전도도는 약 7×10^{-3} cm/sec이다(Kim *et al.*, 2015; Lee *et al.*, 2015). 강변여과수 개발을 위하여 우물통과 8 개의 수평집수정을 계획하였으며, 현재까지 하천 방향 및 약간 어긋난 방향으로 4 개의 수평집수정을 굴착하였다(그림 3).



Fig. 1. Location of the study area (Kim *et al.*, 2015).

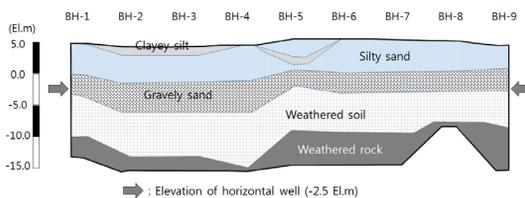


Fig. 2. Geologic profile of the study area (Kim *et al.*, 2015).

3. 연구내용

3.1 토양의 입도분석 특성

연구지역에서 방사형집수정의 수평집수관 시공 중에 수평방향 심도별로 층적층 시료를 채취하여 입도분석을 실시하였다. 입도분석은 골재의 입도분

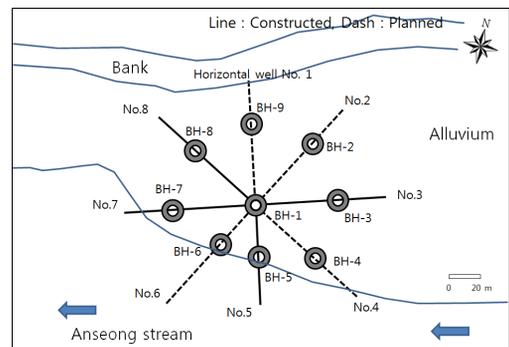


Fig. 3. Design of horizontal wells (revised from Kim *et al.*, 2015).

Table 1. Result of grain size analysis and open area of screen for each horizontal well.

No	n	Grain diameter at each percentage passing condition (mm)										Cu	Cc	Open area (%)
		d10	d15	d20	d30	d40	d50	d60	d70	d85				
#3-02	0.26	0.02	0.03	0.05	0.15	0.32	0.51	0.73	1.04	1.79	44.06	1.78	-	
#3-04	0.26	0.01	0.03	0.03	0.10	0.22	0.40	0.62	0.95	1.96	48.90	1.19	25.0	
#3-06	0.26	0.02	0.03	0.05	0.13	0.28	0.51	0.90	1.60	5.33	58.12	1.22	25.0	
#3-08	0.26	0.01	0.02	0.04	0.11	0.29	0.58	0.99	1.51	3.11	78.85	1.02	25.0	
#3-10	0.26	0.03	0.05	0.09	0.23	0.43	0.66	0.99	1.43	2.83	39.50	2.10	25.0	
#3-12	0.26	0.01	0.02	0.03	0.06	0.13	0.26	0.45	0.71	2.22	40.35	0.73	25.0	
#3-14	0.26	0.01	0.01	0.03	0.05	0.11	0.20	0.38	0.68	1.83	47.41	0.88	25.0	
#3-16	0.30	0.24	0.38	0.56	0.85	1.19	1.66	2.32	3.25	5.89	9.81	1.32	25.0	
#3-18	0.31	0.78	1.05	1.60	2.26	3.45	5.07	6.61	8.61	17.37	8.51	1.00	25.0	
#3-20	0.34	0.57	0.82	1.10	1.37	1.90	2.59	3.52	4.80	8.62	6.18	0.93	25.0	
#3-22	0.29	0.31	0.43	0.54	0.76	1.15	1.78	3.11	6.03	21.45	10.11	0.60	25.0	
#3-24	0.26	0.02	0.02	0.03	0.06	0.10	0.17	0.28	0.41	0.76	18.47	0.81	25.0	
#3-26	0.26	0.01	0.03	0.04	0.09	0.19	0.33	0.54	0.95	2.72	39.12	1.10	-	
#3-28	0.26	0.02	0.02	0.04	0.08	0.17	0.32	0.52	0.81	1.63	32.20	0.74	-	
#3-30	0.26	0.01	0.01	0.02	0.03	0.08	0.14	0.25	0.41	1.01	37.20	0.69	-	
#3-32	0.29	0.03	0.03	0.05	0.09	0.14	0.22	0.30	0.39	0.63	10.34	1.00	-	
#3-34	0.27	0.02	0.03	0.05	0.08	0.14	0.22	0.30	0.39	0.60	14.10	1.10	-	
#3-36	0.30	0.05	0.08	0.12	0.18	0.28	0.38	0.53	0.75	1.60	9.83	1.12	-	
#3-38	0.26	0.01	0.02	0.03	0.05	0.10	0.18	0.32	0.52	1.30	35.30	0.83	-	
#3-40	0.27	0.04	0.05	0.08	0.14	0.24	0.38	0.55	0.79	1.51	14.98	0.97	-	
#3-42	0.26	0.02	0.04	0.06	0.11	0.24	0.40	0.66	1.05	2.17	33.53	0.96	-	
#3-44	0.26	0.02	0.03	0.04	0.08	0.16	0.28	0.46	0.76	1.67	25.94	0.72	-	
#3-46	0.28	0.01	0.01	0.02	0.02	0.04	0.06	0.11	0.20	0.56	13.65	0.72	-	
#3-48	0.28	0.03	0.04	0.05	0.09	0.15	0.24	0.36	0.48	0.68	13.37	0.83	-	
#3-50	0.32	0.03	0.04	0.06	0.09	0.12	0.16	0.22	0.29	0.41	7.48	1.14	-	
#5-02	0.26	0.02	0.04	0.10	0.26	0.44	0.62	0.89	1.25	2.19	44.25	3.67	-	
#5-04	0.26	0.02	0.04	0.07	0.16	0.28	0.44	0.61	0.83	1.65	38.00	2.53	-	
#5-06	0.26	0.03	0.04	0.07	0.14	0.27	0.45	0.77	1.23	2.69	30.64	1.04	25.0	
#5-08	0.26	0.03	0.05	0.09	0.18	0.34	0.55	0.84	1.27	2.76	27.00	1.21	25.0	
#5-10	0.26	0.02	0.04	0.07	0.16	0.27	0.43	0.69	1.13	2.68	28.79	1.49	-	
#5-12	0.33	0.16	0.27	0.38	0.52	0.68	0.88	1.10	1.37	1.91	6.85	1.54	25.0	
#5-14	0.26	0.02	0.03	0.07	0.19	0.41	0.64	0.98	1.49	3.65	61.50	2.29	25.0	
#5-16	0.26	0.02	0.04	0.08	0.22	0.44	0.70	1.08	1.66	4.41	51.62	2.18	25.0	
#5-18	0.26	0.02	0.04	0.07	0.23	0.47	0.74	1.06	1.46	2.71	55.68	2.59	25.0	
#5-20	0.26	0.02	0.03	0.06	0.18	0.42	0.71	1.10	1.63	3.57	64.41	1.78	25.0	
#5-22	0.26	0.02	0.04	0.08	0.21	0.46	0.80	1.16	1.64	9.97	61.11	2.06	25.0	
#5-24	0.32	0.25	0.38	0.52	0.77	1.03	1.34	1.73	2.46	5.21	6.95	1.37	33.3	
#5-26	0.26	0.02	0.04	0.07	0.17	0.40	0.73	1.17	1.82	4.13	58.55	1.26	33.3	
#5-28	0.26	0.01	0.03	0.04	0.11	0.29	0.59	0.99	1.50	3.18	71.00	0.87	33.3	
#5-30	0.26	0.03	0.05	0.08	0.20	0.49	0.87	1.28	1.89	3.36	51.24	1.29	-	
#5-32	0.26	0.03	0.06	0.10	0.28	0.50	0.76	1.09	1.52	2.83	34.06	2.20	-	
#5-34	0.26	0.01	0.02	0.03	0.05	0.08	0.14	0.24	0.43	1.39	30.25	1.14	-	
#5-36	0.26	0.01	0.02	0.03	0.06	0.12	0.19	0.31	0.52	1.35	25.75	1.04	-	
#7-02	0.26	0.02	0.05	0.08	0.23	0.45	0.70	1.03	1.44	2.75	46.73	2.26	-	

Table 1. continued.

No	n	Grain diameter at each percentage passing condition (mm)									Cu	Cc	Open area (%)
		d10	d15	d20	d30	d40	d50	d60	d70	d85			
#7-04	0.27	0.09	0.15	0.27	0.48	0.72	1.01	1.32	1.74	3.27	15.20	1.99	42.3
#7-06	0.35	0.33	0.46	0.57	0.79	1.03	1.31	1.67	2.21	3.89	5.13	1.14	42.3
#7-08	0.32	0.21	0.33	0.46	0.62	0.87	1.16	1.55	2.13	4.52	7.35	1.17	42.3
#7-10	0.26	0.02	0.06	0.12	0.27	0.49	0.77	1.11	1.56	3.06	46.38	2.73	42.3
#7-12	0.26	0.04	0.11	0.25	0.47	0.75	1.18	1.85	3.66	8.02	45.22	2.89	42.3
#7-14	0.26	0.06	0.10	0.18	0.36	0.55	0.79	1.09	1.49	3.18	19.84	2.15	42.3
#7-16	0.32	0.51	0.78	1.00	1.40	2.00	2.77	3.83	5.28	8.40	7.57	1.01	42.3
#7-18	0.26	0.09	0.16	0.26	0.51	0.88	1.39	2.36	5.08	11.64	26.81	1.24	42.3
#7-20	0.34	0.27	0.37	0.48	0.67	0.93	1.25	1.66	2.37	4.76	6.19	1.00	42.3
#7-22	0.26	0.02	0.05	0.09	0.24	0.45	0.70	1.10	1.75	5.28	48.00	2.17	42.3
#7-24	0.31	0.18	0.35	0.49	0.69	0.93	1.16	1.43	1.77	3.20	7.78	1.81	42.3
#7-26	0.32	0.18	0.30	0.39	0.57	0.79	1.04	1.36	1.77	3.49	7.38	1.28	42.3
#7-28	0.33	0.23	0.37	0.49	0.69	0.94	1.21	1.56	2.02	3.75	6.86	1.32	42.3
#7-30	0.34	0.36	0.50	0.66	0.91	1.19	1.55	2.05	3.13	7.83	5.70	1.12	42.3
#7-32	0.33	0.34	0.47	0.59	0.86	1.16	1.56	2.16	3.63	12.05	6.40	1.03	42.3
#7-34	0.34	0.29	0.41	0.52	0.75	1.01	1.30	1.68	2.27	4.06	5.80	1.15	42.3
#7-36	0.28	0.14	0.31	0.47	0.72	1.02	1.35	1.80	2.59	4.86	12.82	2.03	42.3
#7-38	0.34	0.28	0.40	0.51	0.71	0.97	1.27	1.65	2.35	11.23	5.92	1.09	42.3
#7-40	0.26	0.20	0.34	0.51	1.06	3.30	18.65	20.01	21.47	23.85	102.62	0.29	42.3
#8-02	0.26	0.02	0.04	0.06	0.14	0.30	0.54	0.85	1.25	2.36	37.98	1.02	-
#8-04	0.39	0.63	0.86	0.98	1.14	1.39	1.68	2.05	2.83	4.56	3.26	1.01	28.6
#8-06	0.26	0.02	0.03	0.05	0.17	0.35	0.58	0.90	1.32	2.64	46.68	1.64	25.0
#8-08	0.26	0.05	0.16	0.29	0.49	0.73	1.05	1.46	2.06	4.43	26.99	3.06	25.0
#8-10	0.31	0.19	0.36	0.49	0.69	0.95	1.21	1.55	1.98	3.65	8.11	1.63	25.0
#8-12	0.26	0.06	0.14	0.39	0.65	0.95	1.24	1.61	2.15	4.24	28.84	4.70	28.6
#8-14	0.26	0.06	0.12	0.26	0.48	0.76	1.13	1.66	2.72	6.66	28.14	2.40	25.0
#8-16	0.26	0.09	0.19	0.36	0.57	0.86	1.19	1.64	2.62	14.51	19.16	2.31	25.0
#8-18	0.31	0.14	0.27	0.37	0.50	0.66	0.87	1.11	1.41	2.06	7.79	1.59	25.0
#8-20	0.28	0.12	0.25	0.36	0.61	0.94	1.22	1.58	2.13	5.04	13.48	2.02	25.0
#8-22	0.27	0.57	0.81	1.10	1.72	2.97	5.11	7.79	10.23	10.71	13.72	0.67	28.6
#8-24	0.32	0.22	0.31	0.41	0.55	0.72	1.03	1.62	3.41	10.12	7.41	0.84	25.0
#8-26	0.34	0.45	0.53	0.65	0.89	1.22	1.68	2.70	5.20	11.52	6.01	0.65	28.6
#8-28	0.31	0.22	0.32	0.44	0.64	0.94	1.30	1.81	2.66	4.98	8.13	1.03	28.6
#8-30	0.29	0.22	0.33	0.46	0.70	1.05	1.54	2.33	3.74	7.38	10.73	0.97	28.6
#8-32	0.29	0.14	0.20	0.35	0.54	0.76	1.07	1.49	2.12	4.81	10.92	1.45	25.0
#8-34	0.27	0.08	0.16	0.28	0.46	0.65	0.90	1.19	1.56	2.80	15.16	2.27	25.0
#8-36	0.26	0.10	0.26	0.39	0.61	0.97	1.52	2.84	6.30	15.30	29.61	1.38	28.6
#8-38	0.26	0.09	0.16	0.27	0.44	0.67	1.04	1.62	2.88	7.62	18.28	1.36	25.0
#8-40	0.33	0.38	0.49	0.60	0.83	1.16	1.63	2.55	4.79	8.59	6.73	0.72	28.6
#8-42	0.26	0.13	0.24	0.36	0.57	0.91	1.47	2.64	5.60	11.77	19.59	0.92	28.6
#8-44	0.37	0.43	0.51	0.64	0.86	1.09	1.40	1.78	2.59	5.67	4.16	0.96	28.6
#8-46	0.29	0.12	0.18	0.28	0.45	0.63	0.88	1.21	1.67	3.36	10.50	1.45	25.0
#8-48	0.28	0.40	0.51	0.65	0.98	1.52	2.54	4.83	8.04	14.17	12.01	0.50	28.6
#8-50	0.29	0.35	0.47	0.58	0.87	1.33	2.02	3.80	5.96	10.23	10.91	0.57	28.6

Table 2. Various empirical formulas to estimate the hydraulic conductivity.

Equation	C	$f(n)$	d_e	Remark (mm)
Hazen	6.0×10^{-4}	$[1 + 10(n - 0.26)]$	d_{10}	$C_u < 5, 0.1 < d_{10} < 3.0^{(1), (2)}$
Kozeny-Carman	8.3×10^{-3}	$[n^3 / (1 - n)^2]$	d_{10}	$d_{10} < 3.0, \text{Medium sand}^{(3)}$
Beyer	6.0×10^{-4}	$\log(500 / C_u)$	d_{10}	$C_u < 20, 0.06 < d_{10} < 0.6^{(1), (2)}$
Slichter	1.0×10^{-2}	$n^{3.287}$	d_{10}	$0.01 < d_{10} < 5.0^{(1), (2)}$
Terzaghi	$6.1 \times 10^{-3} \sim 10.7 \times 10^{-3}$	$(n - 0.13 / \sqrt{1 - n})^2$	d_{10}	$C = 8.4 \times 10^{-3}, \text{Coarse sand}^{(4)}$
USBR	4.8×10^{-4}	$d_{20}^{0.3}$	d_{20}	$C_u < 5, \text{Medium sand}^{(4)}$

References) 1) Kasenow, 2002, 2) Odong, 2013, 3) Carrier, 2003, 4) Cheng and Chen, 2007.

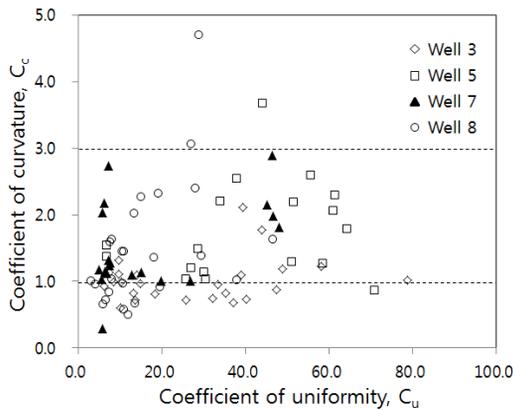


Fig. 4. Characteristics of the grain size distribution.

석시험 규격에 따라 실시하였으며, 수평집수관 4 공 (#3, #5, #7 및 #8)에서 2 m 구간별로 총 88 개 시료를 채취하였다. 입도분석 결과, 수평집수관 8번 공은 중립질 모래 이상이 88%로 투수성이 양호하나, 수평집수관 3번 공에서는 실트질모래 이하가 84%로 투수성이 매우 불량하게 나타났다(Kim *et al.*, 2015).

입도분포곡선을 이용하여 충적층 시료에 대한 균등계수(coefficient of uniformity, C_u)와 곡률계수(coefficient of curvature, C_c)를 산출하였다. 일반적으로 곡률계수가 1~3의 범위를 나타내면 입도분포가 양호한 토양이라 할 수 있다. 균등계수와 곡률계수를 산점도로 도시한 결과, 균등계수의 범위는 3.26~102.62이고, 곡률계수의 범위는 0.29~4.70으로 나타났다(그림 4). 수평집수관의 총 88개 시료 중 60개 시료가 양호한 입도 분포 범위내에 포함되고 있으며, 기타는 입도분포가 불량한 것으로 분석되었다. 수평집수관별 분포특성을 보면, 수평집수관 7번 공은 95.0%, 5번공은 91.7%, 8번공은 32.0% 및 3번

공은 24.0%에 해당하는 시료가 입도 분포가 양호한 곡률계수의 범위에 포함된다(표 1).

3.2 경험식에 의한 수리전도도 산정

대수층의 투수성을 결정짓는 대표적인 수리특성 인자인 수리전도도는 현장 대수성시험이나 실내시험을 통해 구할 수 있으며, 충적층 매질의 경우 공극률과 입경 사이의 관계로부터 추정할 수 있다. Vukovic and Soro (1992)에 의하면 수리전도도 산정은 다음 경험식으로 일반적으로 표현된다(Odong, 2013).

$$K = \frac{g}{\nu} \cdot C \cdot f(n) \cdot d_e^2 \tag{1}$$

여기서, K 는 수리전도도(LT^{-1}), g 는 중력가속도(LT^{-2}), ν 는 20°C 기준 동점성계수(L^2T^{-1}), C 는 분급계수(무차원), $f(n)$ 은 공극률함수(무차원), d_e 는 유효입경(L)이다.

동점성계수는 점성계수와 유체의 밀도로 표현된다.

$$\nu = \mu / \rho \tag{2}$$

여기서, ν 는 동점성계수(L^2T^{-1}), μ 는 점성계수($ML^{-1}T^{-1}$), ρ 는 유체의 밀도(ML^{-3})이다.

공극률은 균등계수를 이용하여 다음과 같이 표현된다(Odong, 2013).

$$n = 0.255(1 + 0.83^{C_u}) \tag{3}$$

여기서, n 은 공극률(무차원), C_u 는 균등계수(무차원)이다. 식 (1)에서 분급계수항과 공극률함수항의 추정은 다양한 경험식에 의하여 구할 수 있는데(표 2),

Table 3. Hydraulic conductivity calculated from grain size analysis using various empirical formulas (unit: cm/sec).

Lateral No.	Hazen	Kozeny-Carman	Beyer	Slichter	Terzaghi	USBR	Lateral No.	Hazen	Kozeny-Carman	Beyer	Slichter	Terzaghi	USBR	
#3	#3-02	-	0.00007	-	0.00003	0.00004	-	#7-02	-	0.00012	-	0.00005	0.00007	-
	#3-04	-	0.00004	-	0.00002	0.00002	-	#7-04	-	0.00225	0.00668	0.00099	0.00149	-
	#3-06	-	0.00006	-	0.00003	0.00004	-	#7-06	-	0.08993	0.12296	0.03363	0.05757	-
	#3-08	-	0.00004	-	0.00002	0.00002	-	#7-08	-	0.02533	0.04746	0.01018	0.01689	-
	#3-10	-	0.00015	-	0.00007	0.0001	-	#7-10	-	0.00014	-	0.00006	0.00009	-
	#3-12	-	0.00003	-	0.00001	0.00002	-	#7-12	-	0.0004	-	0.00018	0.00026	-
	#3-14	-	0.00002	-	0.00001	0.00001	-	#7-14	-	0.0008	0.00247	0.00036	0.00052	-
	#3-16	-	0.02345	0.05533	0.00988	0.01579	-	#7-16	-	0.1411	0.27105	0.057	0.09427	-
	#3-18	-	0.29265	-	0.12061	0.19665	-	#7-18	-	0.00191	-	0.00086	0.00123	-
	#3-20	-	0.22334	0.35973	0.08683	0.14655	-	#7-20	-	0.04982	0.08029	0.01937	0.03269	-
	#3-22	-	0.03866	0.09317	0.01635	0.02603	-	#7-22	-	0.00013	-	0.00006	0.00008	-
	#3-24	-	0.00006	-	0.00003	0.00004	-	#7-24	-	0.0181	0.0356	0.00735	0.01212	-
	#3-26	-	0.00005	-	0.00002	0.00003	-	#7-26	-	0.01919	0.03606	0.00772	0.0128	-
	#3-28	-	0.00006	-	0.00003	0.00004	-	#7-28	-	0.03194	0.05633	0.01267	0.02118	-
	#3-30	-	0.00001	-	0.00001	0.00001	-	#7-30	-	0.09721	0.14569	0.03717	0.06315	-
	#3-32	-	0.00033	-	0.00014	0.00023	-	#7-32	-	0.07524	0.12502	0.02946	0.04956	-
	#3-34	-	0.00014	-	0.00006	0.0001	-	#7-34	-	0.06218	0.09469	0.02386	0.04049	-
	#3-36	-	0.00122	-	0.00051	0.00082	-	#7-36	-	0.00653	0.01814	0.00284	0.00437	-
	#3-38	-	0.00002	-	0.00001	0.00001	-	#7-38	-	0.05629	0.08725	0.02169	0.03675	-
	#3-40	-	0.0004	-	0.00018	0.00027	-	#7-40	-	0.00914	-	0.00413	0.00589	-
#3-42	-	0.00009	-	0.00004	0.00006	-	Average	-	0.03439	0.08069	0.01348	0.02257	-	
#3-44	-	0.00008	-	0.00004	0.00005	-	#8-02	-	0.00012	-	0.00005	0.00008	-	
#3-46	-	0.00002	-	0.00001	0.00001	-	#8-04	0.54077	0.53251	-	0.18033	0.31491	0.44422	
#3-48	-	0.00023	-	0.0001	0.00016	-	#8-06	-	0.00009	-	0.00004	0.00006	-	
#3-50	-	0.00049	-	0.0002	0.00033	-	#8-08	-	0.00072	-	0.00033	0.00047	-	
Average	-	0.02327	0.16941	0.00941	0.0155	-	#8-10	-	0.01872	0.0381	0.00765	0.01255	-	
#5	#5-02	-	0.0001	-	0.00004	0.00006	-	#8-12	-	0.00076	-	0.00034	0.00049	-
	#5-04	-	0.00006	-	0.00003	0.00004	-	#8-14	-	0.00085	-	0.00038	0.00055	-
	#5-06	-	0.00015	-	0.00007	0.0001	-	#8-16	-	0.00196	0.00607	0.00088	0.00128	-
	#5-08	-	0.00024	-	0.00011	0.00015	-	#8-18	-	0.01087	0.02138	0.00441	0.00727	-
	#5-10	-	0.00014	-	0.00006	0.00009	-	#8-20	-	0.00444	0.01261	0.00194	0.00296	-
	#5-12	-	0.01574	0.02775	0.00624	0.01044	-	#8-22	-	0.10219	0.29244	0.04469	0.06808	-
	#5-14	-	0.00006	-	0.00003	0.00004	-	#8-24	-	0.02703	0.05101	0.01088	0.01803	-
	#5-16	-	0.00011	-	0.00005	0.00007	-	#8-26	-	0.14332	0.22522	0.0554	0.09374	-
	#5-18	-	0.00009	-	0.00004	0.00006	-	#8-28	-	0.02529	0.05157	0.01034	0.01696	-
	#5-20	-	0.00007	-	0.00003	0.00004	-	#8-30	-	0.01821	0.04569	0.00776	0.01225	-
	#5-22	-	0.00009	-	0.00004	0.00006	-	#8-32	-	0.00708	0.01797	0.00303	0.00476	-
	#5-24	-	0.03753	0.06698	0.01493	0.02492	-	#8-34	-	0.00183	0.00543	0.00081	0.00121	-
	#5-26	-	0.0001	-	0.00004	0.00006	-	#8-36	-	0.00225	-	0.00101	0.00145	-
	#5-28	-	0.00005	-	0.00002	0.00003	-	#8-38	-	0.00213	0.00658	0.00095	0.0014	-
	#5-30	-	0.00015	-	0.00007	0.0001	-	#8-40	0.09011	0.15637	0.03562	0.05965	-	-
	#5-32	-	0.00025	-	0.00011	0.00016	-	#8-42	-	0.00479	0.01484	0.00214	0.00313	-
	#5-34	-	0.00002	-	0.00001	0.00001	-	#8-44	0.22734	0.19428	0.22252	0.06942	0.12017	0.16672
	#5-36	-	0.00004	-	0.00002	0.00002	-	#8-46	-	0.00526	0.013	0.00223	0.00354	-
	Average	-	0.00305	0.04736	0.00122	0.00202	-	#8-48	-	0.05667	0.15209	0.02447	0.038	-
	Average for 4 wells	0.38405	0.0298	0.08601	0.0115	0.0192	0.30547	#8-50	-	0.04612	0.11692	0.01969	0.03102	-
							Average	0.38405	0.0519	0.08054	0.01939	0.03256	0.30547	

Table 4. Multiple regression equations for estimating flow rate in horizontal well.

Input condition	Multiple regression models
A	$Flowrate = -864.846 \times n + 47.718 \times C_c + 2.576 \times K + 202.401$
B	$Flowrate = -306.759 \times n + 17624.469 \times d_{85} + 0.001 \times K + 72.534$
C	$Flowrate = -990.920 \times n + 64.078 \times C_c + 7.747 \times K + 205.991$
D	$Flowrate = -980.733 \times n + 60.683 \times C_c + 4.532 \times K + 209.370$
Z	$Flowrate = -330.878 \times n + 25260.551 \times d_{70} + 0.234 \times K + 110.371$
A+O	$Flowrate = 19411.473 \times d_{70} - 14.099 \times C_c - 0.944 \times Openarea + 85.205$
B+O	$Flowrate = 21433.479 \times d_{70} + 0.075 \times K - 0.916 \times Openarea + 54.376$
C+O	$Flowrate = 19411.473 \times d_{70} - 14.099 \times C_c - 0.944 \times Openarea + 85.205$
D+O	$Flowrate = 19411.473 \times d_{70} - 14.099 \times C_c - 0.944 \times Openarea + 85.205$
Z+O	$Flowrate = 19463.231 \times d_{70} + 0.235 \times K - 1.002 \times Openarea + 59.998$

Remark) A: Kozeny-Carman method, B: Beyer method, C: Slichter method, D: Terzaghi method, Z: Average hydraulic conductivity, O: Open area of screen.

d_{xx} 는 입자의 통과율(xx)에 따른 입경을 의미하는데, d_{10} 은 입도분포곡선에서 10%에 해당되는 입자의 크기(L)이고 유효입경이라고 한다.

각 경험식을 활용하여 수평집수관내 대수층 시료에 대한 수리전도도를 추정하였다(표 3). 여기에서, 수평굴진의 길이는 사전 시추조사시 방향별로 점토층의 존재 여부에 의하여 결정되었으며, 굴진시에도 지층 확인을 통하여 굴진 계속 여부를 결정하였다. 분급계수항과 공극률함수항 추정을 위하여 제시된 6개 식의 균등계수 및 유효입경 조건에 적합하지 않는 것은 수리전도도 산정에서 제외하였다. 연구지역 시료의 경우 Kozeny-Carman 식, Slichter 식 및 Terzaghi 식의 적용 조건에는 대부분 적합하나, Hazen 식과 USBR 식의 조건에는 2개 시료만이 적합한 것으로 나타났다. Beyer 식에서 균등계수는 41개의 시료, 유효입경은 46개의 시료가 초과하는 것으로 분석되었지만 다른 경험식에 비해 적용할 수 있는 균등계수의 범위가 넓어 모래 내지 자갈과 실트질 모래가 혼재되어 있는 경우를 대표할 수 있는 것으로 해석되며, 특히 수평집수관 7번 공과 8번 공이 해당된다. 6개 방법으로부터 추정한 평균수리전도도를 추정하였으며, 3번 공은 0.05440 cm/sec, 5번 공은 0.01341 cm/sec, 7번 공은 0.03778 cm/sec, 8번 공은 0.04610 cm/sec (Hazen 및 USBR 방법이 지나치게 높은 값을 보이는데 이는 연구지역 시료의 균등계수가 높아 적용성이 낮은 것으로 보임)에 해당한다.

3.3 수평집수관 산출량 추정모형 개발

수평집수관 4공(#3, #5, #7 및 #8)에서의 토질 특성 자료, 추정된 수리전도도 및 지하수의 산출량 자료를 이용하여 산출량에 영향을 미치는 인자를 선별하고, 수평집수관에서 예측 가능한 산출량 추정식을 개발하고자 중회귀분석(multiple regression analysis)을 실시하였다. 중회귀분석은 2개 이상의 독립변수가 종속변수에 미치는 영향을 분석하는 방법으로서, 본 연구에서는 토양입경(d_{10} , d_{15} , d_{20} , d_{30} , d_{40} , d_{50} , d_{60} , d_{70} , d_{85}), 공극률, 균등계수, 곡률계수, 추정 수리전도도, 개공률을 독립변수로 고려하였다. 이들 변수들은 강변여과수 현장 시추 및 실내 분석을 통하여 취득하거나 설계 과정을 통하여 산정할 수 있다. 종속변수는 수평집수관에서 산출되는 유량으로서 각 수평집수관별 개별 운영을 통하여 파악하였다. 독립변수는 2 m 간격으로 취득된 자료로부터 수평집수관별 평균을 구하여 사용하였으며, 산출 유량은 단위 길이당 측정이 불가능하여 수평집수관의 총 유량을 스크린 개공 구간 길이로 나눈 값을 사용하였다. 사전에 유의한 인자의 예측이 어려우므로 독립변수는 모두 진입방식을 적용하였고, 이는 상관성에 따라 종속변수에 유의한 인자들을 선별할 수 있는 방법이다(Seo *et al.*, 2007).

중회귀 모형에 입력변수로 사용된 수리전도도는 각 추정 방법별 수리전도도와 이들을 평균한 수리전도도를 적용하여 각각에 대한 회귀 모형을 도출하였다. 또한, 개공률은 물의 유입 단면과 속도에 영향을

Table 5. Comparison between actual flow rate and estimated flow rate (unit: m³/d/m).

Well	Actual flow rate	A	A+O	B	B+O	C	C+O	D	D+O	Z	Z+O
#3	40.91	38.76	40.92	40.17	40.94	38.44	40.92	38.47	40.92	40.11	40.90
#5	32.73	34.71	32.74	33.44	32.74	34.99	32.74	34.97	32.74	33.53	32.73
#7	34.74	35.47	34.72	35.03	34.71	35.56	34.72	35.55	34.72	35.00	34.70
#8	58.33	59.65	58.38	58.83	58.38	59.82	58.38	59.81	58.38	58.90	58.35

Table 6. Estimated flow rate of each horizontal well (unit: m³/d/m).

Well	Lateral No	Z	Z+O	Well	Lateral No	Z	Z+O
#3	#3-04	24.99	26.72	#7	#7-24	29.10	29.68
	#3-06	33.17	33.02		#7-26	28.29	29.66
	#3-08	32.05	32.15		#7-28	32.45	34.18
	#3-10	30.99	31.36		#7-30	52.63	54.03
	#3-12	21.93	24.37		#7-32	58.68	56.82
	#3-14	21.64	24.14		#7-34	36.89	40.48
	#3-16	48.23	50.07		#7-36	43.65	35.83
	#3-18	125.28	113.49		#7-38	37.48	40.52
	#3-20	69.04	72.98		Average	44.03	40.46
	#3-22	84.34	77.77		#8-04	25.76	43.22
	#3-24	16.78	21.43		#8-06	29.67	30.33
Average	46.22	46.14	#8-08	38.80	37.57		
#5	#5-06	28.43	29.48	#8-10	32.59	40.64	
	#5-08	28.79	29.86	#8-12	40.01	36.63	
	#5-12	20.08	32.38	#8-14	47.12	43.93	
	#5-14	31.81	31.97	#8-16	45.57	43.63	
	#5-16	33.96	33.63	#8-18	23.09	33.38	
	#5-18	31.41	31.66	#8-20	37.76	39.49	
	#5-20	33.59	33.34	#8-22	168.50	144.91	
	#5-22	33.77	33.48	#8-24	50.63	55.84	
	#5-24	36.27	41.04	#8-26	87.70	89.15	
	#5-26	35.97	31.02	#8-28	42.52	46.78	
	#5-28	31.95	27.92	#8-30	59.17	56.72	
Average	31.46	32.34	#8-32	36.13	39.98		
#7	#7-04	33.16	26.42	#8-34	30.78	33.23	
	#7-06	37.09	42.78	#8-36	92.36	76.95	
	#7-08	34.03	34.39	#8-38	48.68	46.20	
	#7-10	32.71	24.00	#8-40	77.26	78.16	
	#7-12	59.17	44.39	#8-42	84.08	71.63	
	#7-14	30.96	23.51	#8-44	48.79	63.48	
	#7-16	96.74	87.67	#8-46	29.49	35.08	
	#7-18	76.81	58.19	#8-48	125.48	109.40	
	#7-20	37.73	40.02	#8-50	94.57	85.54	
	#7-22	35.05	25.80	Average	58.19	57.58	

미칠 수 있으므로, 개공률을 입력변수로 추가하였을 경우에 대해서도 회귀모형을 검토하였다(표 4). 본 회귀식에서 공극률과 곡률계수는 무차원, d_{70} 및 d_{85} 는 m, 수리전도도는 m/d, 개공률은 % 단위를 적용하였다. 추정 방법별로 산정한 수리전도도를 각각 적용한 회귀모형에서는 공극률, 곡률계수 및 수리전도도가 변수로 유의하게 나타났으며, 수리전도도의 전체 평균을 활용한 회귀모형에서는 공극률, d_{70} , 수리전도도가 변수로 유의하게 나타났다. 반면에, 개공률을 추가로 포함할 경우에는, 공극률이 모형에서 제외되었으며 곡률계수와 수리전도도가 입력변수로 사용되는데 각 경우에 따라 비확실적으로 포함되고 있다. 이 식에서 산출량은 스크린 2 m 단위의 유량에 해당한다.

각 방법별로 추정된 산출량을 비교해 보면, 대부분의 방법이 실제 유량과 유사하게 나타났으나 그 중에서 평균 수리전도도와 개공률(Z+O 조건)을 적용한 경우가 실제 산출량과 가장 유사하게 나타났다(표 5). 5개의 수리전도도 추정 방법별로 개공률을 포함한 경우와 아닌 경우를 비교해 보면, 개공률을 함께 고려한 경우가 실제 유량에 더 유사한 것으로 나타났다.

대표적으로 개공률을 포함한 식(Z+O)과 아닌 경우(Z)의 추정식을 활용하여, 표 1의 입도분석 자료를 등을 토대로 수평집수관의 구간별 산출량을 추정하고 회귀모형식의 특성을 검토해 보았다(표 6). 각 공별 m 당 평균 실제 산출량을 보면, 3번공 약 40.91 m³/d로서 46.22 m³/d (Z 방법) 및 46.14 m³/d (Z+O 방법) 보다 낮게 나타났고, 7번 공은 약 34.74 m³/d로서 44.03 m³/d (Z 방법) 및 40.46 m³/d (Z+O 방법) 보다 낮게 나타났다(표 5 참조). 반면에, 5번공과 8번공은 실제 산출량(32.73 m³/d/m 및 58.33 m³/d/m) 과 구간별 산출량의 평균(31.46 m³/d/m (Z 방법), 32.34 m³/d/m (Z+O 방법) 및 58.19 m³/d/m (Z 방법), 57.58 m³/d/m (Z+O 방법))이 매우 유사하게 나타났다. 3번공과 7번공의 오차가 크게 나타난 것을 각 입력변수에 대하여 검토해 보았다. d_{70} 의 표준편차(3번공은 0.00233 m, 7번공은 0.00437 m)가 나머지 2개 수평집수관(5번공은 0.00048 m, 8번공은 0.00227 m)에 비하여 큰 것으로 나타났다. 즉, 회귀모형의 가장 큰 비중을 차지하는 변수인 d_{70} 의 값이 수평집수관의 구간에 따라 다양한데, 일부 지나

치게 낮거나 지나치게 높은 값이 추정 산출량에 오차를 발생시키고 있다. 또한, 3번공의 경우에는, 스크린 구간이 전체 수평집수관의 약 44%로서 물의 유입 통로가 작기 때문에 실제 산출량이 계산 산출량보다 작은 것에 영향을 미친 것으로 판단된다. 또한, 특정 심도인 3번공의 18 m 지점, 7번공의 16 m 지점, 8번공의 22 m, 48 m 지점에서 Z 방법에 의한 추정산출량이 Z+O 방법보다 상당히 높게 나타난 것을 알 수 있다. 이는, 식에서 d_{70} 의 중요도 차이 및 상기 4개 지점에서의 d_{70} 의 값이 타 지점보다 훨씬 높은데서 기인한다.

본 연구지역은 모래 내지 자갈과 실트질 모래가 혼재되어 있는 대수층으로서, 회귀모형식에서 보았듯이 토양입경인 d_{70} 이 지하수 산출량에 큰 영향을 미치는데, 이는 중립질 모래의 분포가 강변여과수 개발 지점 결정에 중요하게 고려되어야할 사항임을 설명해 준다.

4. 토 의

본 연구지역과 같이 하천에 인접한 방사형 집수정의 산출량은 하천 유로까지의 거리와 밀접한 관련성이 있으며, Milojevic 경험식에 의하여 산출량을 추정할 수 있다(Milojevic, 1963a, 1963b).

$$Q = kT \frac{(H-h)}{\left\{ \left(\frac{t}{L} \right)^{0.10} \times \left(\frac{D}{L} \right)^{0.15} \times \left[4.13m^{0.1415} - 1.22 \left(\frac{T}{L} \right) \left(1 / \left(\log \frac{2r}{L} \right) \right)^4 \right] \right\}} \quad (4)$$

$$A = 0.914 + 0.0183m - 0.348 \left(\frac{T}{L} \right)^2 \quad (5)$$

여기에서, Q 는 집수정의 산출량(m³/d), t 는 불투수층으로부터 수평집수관의 높이, D 는 수평집수관의 관경, L 은 수평집수관 길이, m 은 수평집수관의 개수, r 은 집수정에서 하천유로까지 거리, T 는 대수층 두께, k 는 대수층 수리전도도, $H-h$ 는 집수정의 수위강하량에 해당한다. 위 식에서 보듯이, 동일한 분지내에서 케이싱 조건과 수위강하 조건이 동일하다면 지하수 산출량은 취수시설의 지점별 수리전도도, 하천으로부터의 거리 등에 의하여 결정된다. 본 연구에서 수행한 안정천 유역의 각 수평집수관은 동일한 지역내에 해당되므로 위 식에서 각 수평집수관이 위치한 지점의 수리전도도, 하천으로부터의 거리

Table 7. Input data for groundwater yield estimation using the Milojevic equation.

Variables	Input data
D (diameter of horizontal well, m)	0.2
L (Average length of horizontal well, m)	38
m (Number of horizontal well)	4
K (Hydraulic conductivity, m/d)	19.5
T (Thickness of aquifer, m)	6.0
r (Distance to stream, m)	29
t (Height to horizontal well, m)	0.5
H-h (Drawdown at a collector well, m)	5.5

등에 의하여 산출량이 영향을 받음을 알 수 있다. 또한, 식(4)에서 D는 물의 유입 단면에 영향을 미치는 수평집수관의 관경으로서 본 연구에서 개공률과 관련이 있는 특성이다. 따라서, 표 4에서 제시한 산출량 추정식은 동일한 지역내에서의 수평집수관별 지하수 산출량이 각 위치별 수리전도도, 하천으로부터의 거리, 개공률과 관련이 있으며 이는 Milojevic 경험식에 의해서도 유사하게 설명이 된다.

한편, Milojevic 경험식을 활용하여 연구지역 집수정의 지하수 산출량을 추정하였다(표 7). 각 수평집수정의 구간별 수리전도도는 표 3의 Kozeny-Carman, Beyer, Slichter 및 Terzaghi 방법에 의한 수리전도도의 평균값을 적용하였다. 수리전도도는 Log normal 분포를 보이므로 지수함수($K = \exp(y + 0.5s_y^2)$)에 의한 대표값을 구하여 적용하였다(Helsel and Hirsch, 2002). 여기에서 K 는 수리전도도, y 는 표본의 평균, s_y 는 로그단위의 표본의 분산을 의미한다. 이로부터 추정된 연구지역의 평균 수리전도도는 19.5 m/d로 산정되었다. 이로부터 계산된 Milojevic 경험식에 의한 지하수 산출량은 약 4,110 m³/d로서, 실제 산출량 4,000 m³/d과 유사하게 산정되었다. 이와 같은 결과는, Milojevic 경험식에서 수리전도도와 하천으로부터의 거리는 집수정의 산출량에 가장 큰 영향을 미치는 요인으로서, 하천으로부터의 거리에 오차가 없다면 본 연구에서 4가지 방법으로 추정된 수리전도도의 평균값이 연구지역의 대수층 특성을 잘 대표함을 설명해 준다.

한편, 각 수평집수관별로 개별 지하수 산출량은 출구를 폐쇄하면서 현장 양수를 통하여 실측하였다. 지하수 산출량은 3번 공은 900 m³/d, 5번 공은 720 m³/d, 7번 공은 1,320 m³/d, 8번 공은 2,800 m³/d

으로서 총 합은 5,740 m³/d에 해당하여 4개를 모두 개방한 상태에서의 총산출량 약 4,000 m³/d보다 높게 나타났다. 이와 같은 현상은 동시 양수시의 각 수평집수관별 간섭 효과에 의하여 각 수평집수관 주변의 영향권이 중복됨으로써 개별 양수시보다 유입량이 줄어들게 되는 효과가 발생하며, Milojevic 경험식의 관점에서 보면 수위강하량($H-h$)이 줄어드는 현상으로 반영이 된다. 아울러, 총 산출량 계산에는 수평집수관의 하천으로부터의 평균 이격 거리가 적용되었으나 실제 각 수평집수관의 이격 거리는 방향별로 차이를 보이기 때문에 판단된다. 이와 같은 결과는 Milojevic의 경험식에서 수평집수관의 길이가 정해져 있다면, 수위강하량의 차이와 하천으로부터의 거리 차이가 지하수 산출량에 가장 민감한 인자로 작용한다는 기존 연구 결과에 의해서 설명이 가능하다(Kim, G.B. *et al.*, 2014).

5. 결 언

본 연구에서는 강변여과수의 수평집수관에서 채취한 층적층 시료의 입도분석 자료와 이로부터 추정된 수리전도도 및 스크린 설계 자료를 입력변수로 활용하여 수평집수관별 지하수 산출량 추정 기법을 개발하고자 하였다. 실제 수평집수관별 지하수 산출량과 입력변수간의 회귀 분석을 실시한 결과, 평균 수리전도도를 적용한 회귀식에서는 공극률, d_{70} , 수리전도도가 입력 인자로 결정되었으며, 개공률을 추가 인자로 고려한 회귀식에서는 d_{70} , 수리전도도, 개공률이 입력 인자로 결정되었다. 이들 2개 모형으로부터 추정된 수평집수관별 지하수 산출량은 실제 각 공별 지하수 산출량과 유사한 것으로 나타났다.

다만, 일부 d_{70} 의 범위가 넓게 분포하거나, 총 수평집수관의 일부에만 스크린이 설치되는 경우에는 추정값의 오차가 다소 발생하는 것으로 나타났다.

본 연구는 강변여과수 개발시 시추를 통하여 채취된 토양 시료로부터 취득할 수 있는 정보를 활용하여 수평집수관의 단위길이당 산출량을 추정할 수 있는 식을 개발한 것으로서, 타당성 조사나 설계 초기 단계에서 적용이 가능할 것으로 본다. 다만, 본 연구에서 보듯이 입도의 분포 특성에 따라 추정량에 오차가 발생할 수 있으므로, 향후 추가적인 데이터를 확보하여 회귀식을 보완한다면 국내 실정에 맞는 설계에 사용할 수 있는 보다 합리적인 방법이 고안될 것으로 본다.

사 사

본 연구는 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원에서 위탁시행한 물관리연구사업(11기 술혁신C05)에 의한 ‘수변지하수활용고도화’ 연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

Carrier, W.D., 2003, Goodbye, Hazen; Hello, Kozeny-Carman. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 129(11), 1054-1056.

Cheng, C. and Chen, X., 2007, Evaluation of methods for determination of hydraulic properties in an aquifer-aquitard system hydrologically connected to a river. *Hydrogeology Journal*, 15(4), 669-678.

Helsel, D.R. and Hirsch, R.M., 2002, *Statistical Methods in Water Resources*. USGS Techniques of Water Resources Investigations, Book 4, Chapter A3, U.S. Geological Survey, Reston, 510 p.

Kasenow, M., 2002, *Determination of Hydraulic Conductivity from Grain Size Analysis*. Water Resources Publications, LLC, 97 p.

Kim, G.B., Jeong, J.H. and Lee, S.H., 2014, Evaluation of groundwater yield from riverbank filtration system considering water levels' increase in the middle Nakdong

River. *Journal of the Geological Society of Korea*, 50(3), 401-407 (in Korean with English abstract).

Kim, G.B., Lee, J.W. and Lee, C.H., 2015, Estimation of drilling velocity for horizontal wells based on alluvial sediment characteristics. *The Journal of Engineering Geology*, 25(2), 273-280 (in Korean with English abstract).

Kim, T.H., Jeong, J.H., Kim, M., Oh, S.H. and Lee, J.S., 2014, Analysis of the correlation between geological characteristics and water withdrawals in the laterals of radial collector well. *The Journal of Engineering Geology*, 24(2), 201-215 (in Korean with English abstract).

Kyunggi Research Institute, 2008, *Research on the Water Resources Security by the Riverbank Filtration Technology*. Seoul, 24-55 (in Korean).

K-water, 2008, *Manual for a Technology of Riverbank Filtration System*. Daejeon, 237 p.

Lee, C.H., Lee, S.K., Kim, M., Park, H.J. and Kim, G.B., 2015, Design of filter pack and well screen for the horizontal gallery of radial collector well considering soil distribution in riverside alluvium. *Journal of the Geological Society of Korea*, 51(4), 389-395 (in Korean with English abstract).

Milojevic, M., 1963a, Discussion on flow of groundwater to collector wells. *Journal of the Hydraulics Division*, 89(2), 193-194.

Milojevic, M., 1963b, Radial collector wells adjacent to the riverbank. *Journal of the Hydraulics Division*, 89(6), 133-151.

Odong, J., 2013, Evaluation of empirical formulae for determination of hydraulic conductivity based on grain-size analysis. *International Journal of Agriculture and Environment*, 4(1), 1-8.

Seo, H.S., Yang, K.S., Kim, N.Y., Kim, H.Y. and Kim, M.K., 2007, *Regression Analysis using SPSS*. Hannarae publisher, Korea, 295 p (in Korean).

Vukovic, M. and Soro, A., 1992, *Determination of Hydraulic Conductivity of Porous Media from Grain-Size Composition*. Water Resources Publications, 83 p.

Received : June 3, 2016
 Revised : June 16, 2016
 Accepted : June 16, 2016