

## 총적층 입자 특성을 고려한 수평집수정 굴착 속도 추정

김규범<sup>1</sup> · 이정운<sup>2</sup> · 이치형<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>K-water연구원, <sup>2</sup>주인텔리지오

## Estimation of Drilling Velocity for Horizontal Wells Based on Alluvial Sediment Characteristics

Gyoo-Bum Kim<sup>1</sup>, Jeong-Woon Lee<sup>2</sup>, Chi-Hyung Lee<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>K-water Institute

<sup>2</sup>Intelligeo Co. Ltd

Received 2 June 2015; received in revised form 13 June 2015; accepted 15 June 2015

---

강변여과수의 수평집수정 시공시 불균질성 지층에 의한 굴착 지연 등은 전체 굴착 공정에 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 안성천 지역에서 시공 중인 수평집수정의 굴착 과정에서 심도별로 취득된 입도분석 자료, 균등계수, 곡률계수를 활용하여 실제 굴착 속도를 추정하는 방안을 제시하였다. 균등계수와 곡률계수를 입력인자로 사용한 회귀식을 도출한 후 타 수평집수정에 적용한 결과, 조립질이면서 분급이 양호한 지층에 추정식이 잘 맞는 것으로 나타났다. 본 연구 결과는 중소규모의 하천을 대상으로 개발된 만큼, 향후 대하천 주변의 굴착 정보를 활용하여 추정식을 보완한다면 보다 정확한 설계 및 효율적인 시공 관리가 가능할 것이다.

**주요어:** 강변여과수, 수평집수정, 입도분석, 균등계수, 곡률계수

Delays in horizontal well drilling when encountering heterogeneous sediments can have negative effects on the construction process at a riverbank filtration site. Grain size analysis, including calculation of the coefficient of uniformity and the coefficient of curvature, was conducted on soil samples collected at each drilling depth during the process of drilling horizontal wells. These results were then used to develop a linear equation for estimating drilling velocity using the coefficient of uniformity and the coefficient of curvature as inputs. Testing of the linear equation in other horizontal wells indicates that the equation is most appropriate for coarse-sand-sized and well-sorted sediment. Because this study was conducted in a region with small- to medium-sized streams, more data are needed from larger rivers to modify the general equation. Our results will provide better estimates of drilling velocity, in turn enabling more detailed design and more effective construction management at riverbank filtration sites.

**Key words:** riverbank filtration, horizontal well, grain size analysis, coefficient of uniformity, coefficient of curvature

---

---

\*Corresponding author: [hyungnom@dreamwiz.com](mailto:hyungnom@dreamwiz.com)

© 2015, The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 서 론

국내에서 간접취수 사업은 충분한 기술 확보를 선행하기 보다는 사업과 기술 확보가 병행됨으로써 일부 시행 착오가 있어 왔다. 하천수를 간접취수 함으로서 좋은 수질의 수원을 항시 공급하고, 상수원보호구역을 완화하여 지역 개발이 가능해짐으로써 해당 지역에 대한 투자 가치가 높아지기 때문에 여러 지방자치단체에서 강변여과수 개발을 추진해 왔다. 1998년 창원시 북면 강변여과수 사업을 시작으로 대산면 강변여과수 사업이 추진되었으며, 2004년에는 가평군 가평읍 자라섬 강변여과수 사업, 2005년에 함안군 칠서면 강변여과수 사업 등이 시행된 바 있으며, 이후에도 김해시 탄성 강변여과수 개발이 추진된 바 있다. 강변여과수는 천부의 하천수와 혼합된 지하수가 모래 자갈층을 통과하면서 느리게 이동하여 수질이 개선되므로 지표수의 수질 사고 및 고탁도 문제 등에 대응할 수 있는 장점을 갖고 있다(K-water, 2008; Kyunggi Research Institute, 2008). 최근에는 한국수자원공사에서 경상남도 창원군 중산리 지역에서 대규모 강변여과수 개발 사업을 진행 중에 있어 수량 및 수질 확보를 위한 관련 기술의 개발이 요구되고 있다. 한편, 4대강 사업에 의하여 하천 수위가 상승되면서 하천변 지하수 부존량이 증가하였으며, 과거에 비하여 양수시 더 많은 수위강하가 가능해 짐으로써 강변여과수 개발 여건은 개선되었다고 볼 수 있다(Kim et al., 2014). 그러나, 강변여과수 개발 방식에 의한 지하수 취수량을 극대화하기 위해서는 조사, 설계 및 시공 기술이 개선될 필요가 있다.

지난 10여년 동안 국내에서는 강변여과수 개발과 관련한 조사 및 연구가 지속되었으나, 국내 하천변의 충적층 특성을 잘 고려할 수 있는 최적 설계 및 시공 기술은 아직 미흡한 실정이다. K-water (1996) 및 ME (2009)는 국내 강변여과수 개발 여건에 대한 조사를 실시하여 수원으로서의 강변여과수 활용 방안을 제시한 바 있으며, 수질 및 수량 측면의 연구로는 하천변 충적층을 통한 강변여과수의 수질 개선 효과에 대한 연구(Choi et al., 2007; Kim et al., 2009; Lee et al., 2012), 강변여과수 개발가능량의 평가 및 증대 기술에 대한 연구(Kim et al., 2010; Kim et al., 2012; Kim et al., 2014) 등이 수행되어 관련 기술이 축적되어 왔다. 그러나, 국내 충적층의 다양한 입자 조건에서의 설계 및 시공 경험이 부족하여 우물통 및 수평집수정의 굴착 중에 시공 상의 문제에 접하고 전체 공정을 지연시키거나 부정확한 시

공이 발생되어 목표 수량이나 수질 조건을 만족시키지 못하는 사례들도 나타날 수 있다.

본 연구에서는 강변여과수 시공 현장의 수평집수정 굴착시 나타난 굴착 효율을 분석하고 충적층 매질 및 지하수 특성과의 비교를 통하여 충적층의 매질 특성을 고려한 수평집수정 굴착에 필요한 시공 기간을 예측할 수 있도록 함으로써 적정 설계에 도움을 주고자 하였다.

## 연구지역

연구지역은 경기도 안성시, 평택시 및 충청남도 천안시가 만나는 안성천 지점으로서, 지형적으로는 북동부에서 남서부 방향으로 이어지는 칠현산(516 El.m)-덕성산(515 El.m)-서운산(538 El.m)이 동남부 주 산계를 형성하고, 천덕산-덕암산(164 El.m)으로 이어지는 북동-북서 방향의 산계가 발달되며 이들에 둘러싸인 넓은 충적 분지에 강변여과수 개발 연구지역이 위치하고 있다(Fig. 1a). 연구지역에서 선캄브리아기의 편마암으로 구성된 지역은 풍화에 강한 암석의 영향으로 풍화 퇴적물을 형성하지 않고 산악 지형을 이루는 반면, 유라기의 화강암

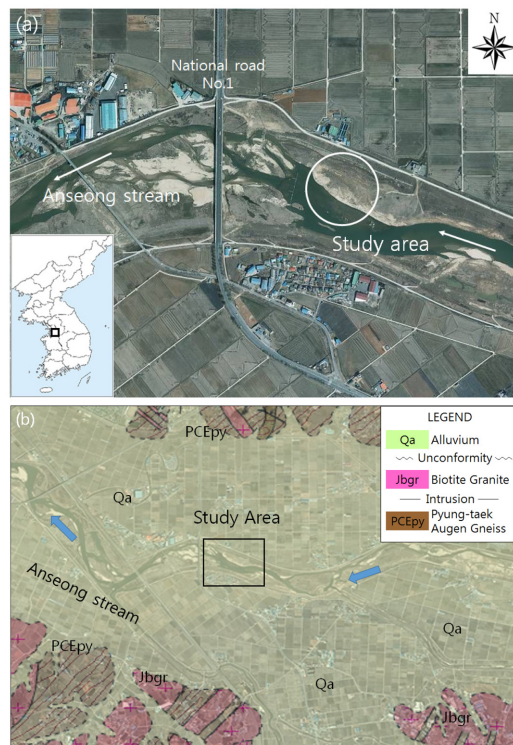


Fig. 1. (a) Location and (b) a regional geologic map of the study area.

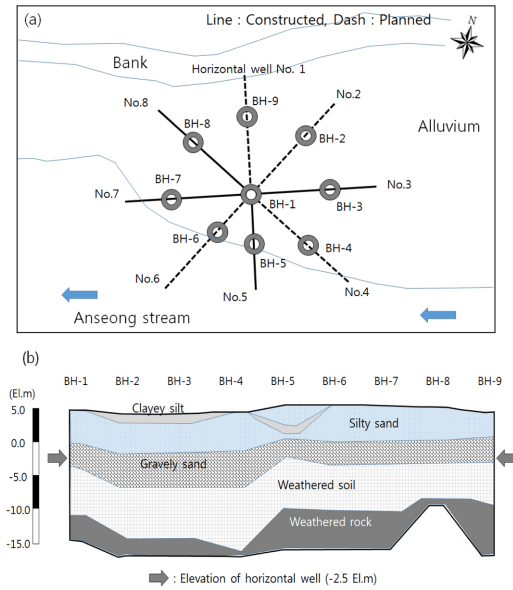


Fig. 2. (a) Distribution of horizontal wells and (b) geologic profile of the study area.

지역은 층적층이나 구릉지 형성이 잘 발달되어 상대적으로 저지대를 형성한다(Fig. 1b). 안성천은 칠현산에서 발원하여 현암천, 한천, 청룡천, 입장천, 성천과 합류되어 연구지역을 동부에서 서부 방향으로 흘러 도일천, 진위천과 만나 아산만으로 유입되고 있다(MOLIT, 2014). 강변여과수 개발을 위하여 우물통과 8개의 수평집수정을 계획하였으며, 금회 1차 연구기간(2014~2015년) 동안에는 하천 방향 및 약간 어긋난 방향으로 4개의 수평집수정을 굴착하였다. 또한, 설계에 필요한 지층 특성 인자를 도출하기 위하여 우물통 및 수평집수정을 대상으로 총 9개의 시추를 실시하였다(Fig. 2b).

층적층의 두께는 지표로부터 약 6.0~9.9m로서, 하부로부터 풍화토, 모래질 자갈, 실트질 모래, 점토질 실트로 구성되며, 지하수를 부존하고 있는 주 대수층인 자갈질 모래층이 수평집수정 굴착 대상 심도로 결정되었다(Fig. 2b). 시추공에 대한 현장 투수시험 결과, 하부 자갈질 모래의 수리전도도는  $1.06 \times 10^{-3} \text{ m/sec}$  내지  $1.24 \times 10^{-2} \text{ m/sec}$ , 상부 실트질 모래 및 점토질 실트의 경우에는  $2.20 \times 10^{-5} \text{ m/sec}$  내지  $2.12 \times 10^{-2} \text{ m/sec}$ 의 범위를 보인다.

### 집수정 시공

강변여과수 개발을 위한 집수정 구조물은 우물통과

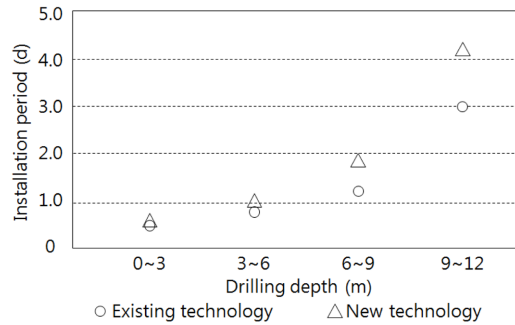


Fig. 3. Changes in the caisson installation period through the application of a new technology in this study.

수평집수정으로 구분되는데, 우물통의 시공을 위하여 우물통 침설 축진식 방사형 집수정 시공방법(특허 제 10-1347866호)을 적용하였다. 본 방법은 우물통 침설과 동시에 벤토나이트를 주입함으로써 지반과의 마찰력을 감소시켜 침설 속도를 향상시키는 기술이다. 우물통 내경은 6.0 m, 벽체 두께는 0.7 m, 집수정의 높이는 총 14.7 m 및 지표면 슬래브 돌출 높이는 0.5 m로 계획하였으며, 실제 본 방법에 의한 우물통 침설 결과 기존 방법에 의한 침설 속도(1.56 m/d)와 비교하여 약 37%가 증가된 2.14 m/d의 속도를 보였다(Fig. 3).

수평집수정은 45° 간격으로 총 8개를 계획하였으며, 금회 연구에서는 일차적으로 4개소를 시공하였다. 연구 지역 매질이 모래와 자갈이 혼재되어 있는 점과 굴착 중 시료채취 가능성을 고려하여 회전식 굴착 공법(장비명 : FS-100B-KG2)을 적용하였으며, 심도별 시료 채취를 병행하였다. 수평집수정별 설계 요인 및 효율 평가를 위하여 스크린 차등 설계, 필터팩 스크린 적용 여부, 굴착 방향(하천 및 반대 방향) 등을 다양화하여 설계하였다. 금회 시공된 4개 수평집수정은 3, 5, 7 및 8번 공으로서, 굴착 높이는 -1.5 El.m에서 내경 315.6 mm로 시공되었으며, 5번 공은 38 m, 나머지 3개 공은 약 50 m 깊이까지 굴착하였다(Fig. 1b 참조).

### 수평집수정 굴착 특성

수평집수정의 굴착 특성을 분석하기 위하여, 스크린이 설계된 3 및 8번 수평집수정을 대상으로 굴착 진행 시 토양의 육안 분류, 케이싱의 주입 압력, 오거의 주입 압력, 시료에 대한 입도 분석, 굴착 속도(외부 파이프가 추진된 시간으로 추정) 및 지하수 유출량 추정 등을 2 m 간격으로 수행하였다(Table 1, Table 2). 층적층 입

**Table 1.** Drilling characteristics and soil analysis at horizontal well No. 3.

Depth (m)	C.I.P. <sup>1)</sup> (MPa)	A.P. <sup>2)</sup> (MPa)	Inflow <sup>3)</sup>	Grain size analysis (mm)								Cu <sup>4)</sup>	Cg <sup>5)</sup>	USCS <sup>6)</sup>	D.V. <sup>7)</sup> (min/2 m)
				D85	D70	D60	D50	D40	D30	D15	D10				
2	5	6	L	1.79	1.04	0.73	0.51	0.32	0.15	0.03	0.02	44.06	1.78	SM	24
4	5	12	L	1.96	0.95	0.62	0.40	0.22	0.10	0.03	0.01	48.90	1.19	SM	60
6	5	10	L	5.33	1.60	0.90	0.51	0.28	0.13	0.03	0.02	58.12	1.22	SM	60
8	5	8.5	L	3.11	1.51	0.99	0.58	0.29	0.11	0.02	0.01	78.85	1.02	SM	33
10	5	9	L	2.83	1.43	0.99	0.66	0.43	0.23	0.05	0.03	39.50	2.10	SM	47
12	5	9	L	2.22	0.71	0.45	0.26	0.13	0.06	0.02	0.01	40.35	0.73	SM	49
14	5	9.5	L	1.83	0.68	0.38	0.20	0.11	0.05	0.01	0.01	47.41	0.88	SC	60
16	6	8	H	5.89	3.25	2.32	1.66	1.19	0.85	0.38	0.24	9.81	1.32	SP	50
18	6	7.5	H	17.37	8.61	6.61	5.07	3.45	2.26	1.05	0.78	8.51	1.00	GP	28
20	5.5	7	H	8.62	4.80	3.52	2.59	1.90	1.37	0.82	0.57	6.18	0.93	SP	29
22	6	8	L	21.45	6.03	3.11	1.78	1.15	0.76	0.43	0.31	10.11	0.60	SP	38
24	7	7.5	L	0.76	0.41	0.28	0.17	0.10	0.06	0.02	0.02	18.47	0.81	SM	38
26	8.5	8.5	L	2.72	0.95	0.54	0.33	0.19	0.09	0.03	0.01	39.12	1.10	SM	28
28	8	10	L	1.63	0.81	0.52	0.32	0.17	0.08	0.02	0.02	32.20	0.74	SM	25
30	8	10	L	1.01	0.41	0.25	0.14	0.08	0.03	0.01	0.01	37.20	0.69	SM	27
32	6.5	8.5	L	0.63	0.39	0.30	0.22	0.14	0.09	0.03	0.03	10.34	1.00	SM	25
34	7	8	L	0.60	0.39	0.30	0.22	0.14	0.08	0.03	0.02	14.10	1.10	SM	19
36	8	8	L	1.60	0.75	0.53	0.38	0.28	0.18	0.08	0.05	9.83	1.12	SM	23
38	8	12	L	1.30	0.52	0.32	0.18	0.10	0.05	0.02	0.01	35.30	0.83	SM	35
40	8	12	L	1.51	0.79	0.55	0.38	0.24	0.14	0.05	0.04	14.98	0.97	SM	19
42	8	8	L	2.17	1.05	0.66	0.40	0.24	0.11	0.04	0.02	33.53	0.96	SM	20
44	8	9	L	1.67	0.76	0.46	0.28	0.16	0.08	0.03	0.02	25.94	0.72	SM	16
46	9	9	L	0.56	0.20	0.11	0.06	0.04	0.02	0.01	0.01	13.65	0.72	ML	19
48	8	8	L	0.68	0.48	0.36	0.24	0.15	0.09	0.04	0.03	13.37	0.83	SM	19
50	8	8	L	0.41	0.29	0.22	0.16	0.12	0.09	0.04	0.03	7.48	1.14	SM	21

Remark) 1) Casing injection pressure, 2) Auger pressure, 3) L: low, M: medium, H: high, 4) Coefficient of uniformity, 5) Coefficient of curvature, 6) Unified soil classification system, 7) Drilling velocity.

자의 분포를 보면, 3번 수평집수정의 경우에는 실트질 모래가 우세하고 모래 내지 자갈이 일부 분포하는 반면에 8번 수평집수정은 모래가 우세하며 일부 실트질 모래와 자갈이 분포하고 있다. 토양 입자의 균등계수(Cu)의 평균 및 표준편차를 보면, 3번 수평집수정은 27.89 및 18.94이 반면, 8번 수평집수정은 16.17 및 11.11로서 3번에 비하여 8번 수평집수정 지점에서 입도 분포가 상대적으로 양호함을 알 수 있으며, 심도별로 편차도 작음을 알 수 있다. Vukovic and Soro (1992)가 제시한 공극률 추정식( $n = 0.255(1 + 0.83^{Cu})$ )을 적용해 보면, 8번 수평집수정에서의 공극률이 크며 통기저항도 적음을 의미한다. 3번 수평집수정에서 평균입경(D50)은 0.71 mm, 평균입경의 심도별 표준편차는 1.09 mm인 반면에, 8번

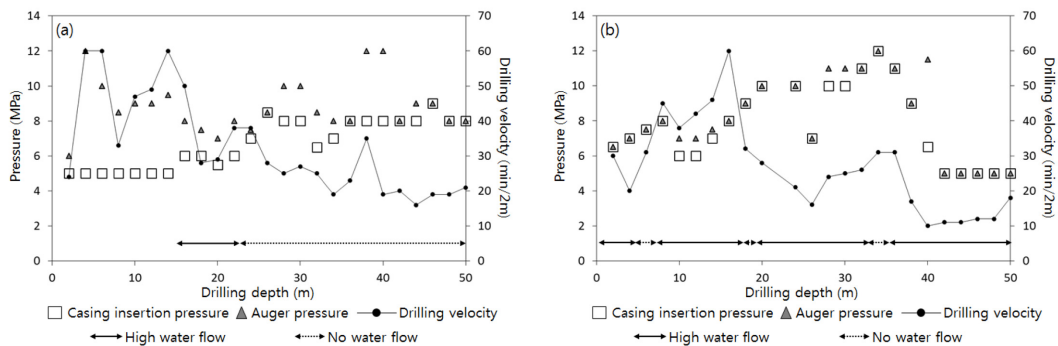
수평집수정에서는 각각 1.43 mm 및 0.88 mm로 나타났다. 이와 같은 매질 특성은 실제 현장 굴착 직후 측정된 지하수 유출량에 영향을 미치는데, 3번 수평집수정에서 900 m<sup>3</sup>/d, 8번 수평집수정에서 2,800 m<sup>3</sup>/d로 나타나 8번에서 훨씬 높은 값을 보이고 있다. 특히, 두 지점 공히 균등계수가 약 10 이하인 경우에 다량의 지하수가 배출되고 있다.

평균 굴착 속도는 3번 수평집수정이 16.92 min/m인 반면에, 8번 수평집수정은 13.38 min/m로 빠르게 나타났으며 상대적으로 입자 분포가 균질하여 편차도 작은 것으로 나타났다(Fig. 4). 케이싱의 주입 압력과 오거의 압력 간의 상관성은 상대적으로 입자가 굵고 균질성을 갖고 있는 8번 수평집수정에서 높은 것을 알 수 있다. 그

**Table 2.** Drilling characteristics and soil analysis at horizontal well No. 8.

Depth (m)	C.I.P. <sup>1)</sup> (MPa)	A.P. <sup>2)</sup> (MPa)	Inflow <sup>3)</sup>	Grain size analysis (mm)								Cu <sup>4)</sup>	Cg <sup>5)</sup>	USCS <sup>6)</sup>	D.V. <sup>7)</sup> (min/2 m)
				D85	D70	D60	D50	D40	D30	D15	D10				
2	6.5	6.5	H	2.36	1.25	0.85	0.54	0.30	0.14	0.04	0.02	37.98	1.02	SM	30
4	7	7	H	4.56	2.83	2.05	1.68	1.39	1.14	0.86	0.63	3.26	1.01	SP	20
6	7.5	7.5	L	2.64	1.32	0.90	0.58	0.35	0.17	0.03	0.02	46.68	1.64	SM	31
8	8	8	H	4.43	2.06	1.46	1.05	0.73	0.49	0.16	0.05	26.99	3.06	SP-SM	45
10	6	7	M	3.65	1.98	1.55	1.21	0.95	0.69	0.36	0.19	8.11	1.63	SW-SM	38
12	6	7	H	4.24	2.15	1.61	1.24	0.95	0.65	0.14	0.06	28.84	4.70	SP-SM	42
14	7	7.5	H	6.66	2.72	1.66	1.13	0.76	0.48	0.12	0.06	28.14	2.40	SM	46
16	8	8	H	14.51	2.62	1.64	1.19	0.86	0.57	0.19	0.09	19.16	2.31	SW-SM	60
18	9	9	H	2.06	1.41	1.11	0.87	0.66	0.50	0.27	0.14	7.79	1.59	SW-SM	32
20	10	10	L	5.04	2.13	1.58	1.22	0.94	0.61	0.25	0.12	13.48	2.02	SW-SM	28
22	10	10	H	10.71	10.23	7.79	5.11	2.97	1.72	0.81	0.57	13.72	0.67	GP	32
24	10	10	H	10.12	3.41	1.62	1.03	0.72	0.55	0.31	0.22	7.41	0.84	SP	21
26	7	7	H	11.52	5.20	2.70	1.68	1.22	0.89	0.53	0.45	6.01	0.65	SP	16
28	10	11	H	4.98	2.66	1.81	1.30	0.94	0.64	0.32	0.22	8.13	1.03	SW	24
30	10	11	H	7.38	3.74	2.33	1.54	1.05	0.70	0.33	0.22	10.73	0.97	SP	25
32	11	11	H	4.81	2.12	1.49	1.07	0.76	0.54	0.20	0.14	10.92	1.45	SW	26
34	12	12	L	2.80	1.56	1.19	0.90	0.65	0.46	0.16	0.08	15.16	2.27	SW-SM	31
36	11	11	L	15.30	6.30	2.84	1.52	0.97	0.61	0.26	0.10	29.61	1.38	SW-SM	31
38	9	9	H	7.62	2.88	1.62	1.04	0.67	0.44	0.16	0.09	18.28	1.36	SW-SM	17
40	6.5	11.5	H	8.59	4.79	2.55	1.63	1.16	0.83	0.49	0.38	6.73	0.72	SP	10
42	5	5	H	11.77	5.60	2.64	1.47	0.91	0.57	0.24	0.13	19.59	0.92	SP-SM	11
44	5	5	H	5.67	2.59	1.78	1.40	1.09	0.86	0.51	0.43	4.16	0.96	SP	11
46	5	5	H	3.36	1.67	1.21	0.88	0.63	0.45	0.18	0.12	10.50	1.45	SW-SM	12
48	5	5	H	14.17	8.04	4.83	2.54	1.52	0.98	0.51	0.40	12.01	0.50	SP	12
50	5	5	H	10.23	5.96	3.80	2.02	1.33	0.87	0.47	0.35	10.91	0.57	SP	18

Remark) same as Table 1.



**Fig. 4.** Casing insertion pressure, auger pressure, and drilling velocity versus drilling depth at two horizontal wells: (a) No. 3 and (b) No. 8.

러나, 2개 수평집수정에서 케이싱의 주입 압력과 오거의 압력이 굴착 속도와 뚜렷한 유의미한 관계를 보이지

는 않고 있으나, 지하수의 유출량은 케이싱의 주입 압력과 오거 압력이 낮은 구간에서 상대적으로 높게 나타나

는 특성을 갖고 있다. 연구 지역의 경우 수평집수정에 미치는 수두가 크기 않아 지하수압에 의한 굴진 속도의 영향을 발생하지 않으나, 지하수가 유출되는 구간에서는 선단부의 토질이 느슨해지거나 자연적인 공경이 발생하여 굴착이 용이해지게 됩니다.

### 수평집수정 굴착 속도 추정식 제안

이상 층적층의 특성에 차이를 보이는 2개 수평집수정의 굴착 자료를 활용하여 실제 수평집수정 설계시 굴착 순 소요 시간을 추정하는 방안을 검토해 보았다. 강변여과수 설계를 위해서는 수평집수정 위치에서의 다양한 시추를 실시하거나 물리탐사를 활용하여 층적층의 단면 분포를 추정하게 된다. 위에서 분석한 바와 같이, 수평집수정의 굴착 속도는 입자의 종류 및 크기, 물의 유무 등에 의하여 영향을 받는 것으로 파악되는데, 현장에서 심도별로 측정된 입자의 물리적 특성 자료를 활용하여 굴착 속도를 예측할 수 있다면, 시추조사에서 취득된 정보를 활용하여 굴착 공기를 예상하고 설계에 반영할 수 있다. 또한, 최적의 공정 설계를 위하여 개발 대상지역의 층적층 입자 특성 규명을 위한 수평집수정별 시추 물량 결정에도 활용할 수 있다.

굴착 속도와와의 비교를 위하여 각 심도별 시료에 대한 입도분석 결과, 균등 계수(Cu), 곡률계수(Cg) 등 총 10개의 입력 인자로 활용하여 다중회귀분석을 실시하였다. 유의한 독립변수를 선택하기 위하여 단계선택법에 의한 다중 회귀분석을 실시하였다(Table 3). 3번 수평집수정의 경우, 굴착 속도와 균등계수의 Pearson 상관계수는 0.474 (유의수준 0.017)로 유의하게 나타났으나, 굴착 속도와 곡률계수의 상관성은 유의하지 않게 나타났다. 다중회귀분석 결과, 입도분석 결과와 곡률계수를 제외한 균등계수만이 모형의 독립변수로 적합한 것으로 나타났으며, 모형의 설명력은 0.225로 다소 낮은 편이다.

$$DV_{w3} = \frac{22.635 + 0.353 \times C_u}{2} \quad (1)$$

여기에서,  $DV_{w3}$ 는 3번 수평집수정에게 적합한 모형으로서 단위는 min/m이다.

8번 수평집수정의 경우, 굴착 속도와 균등계수의 Pearson 상관계수는 0.475(유의수준 0.016), 굴착 속도와 곡률계수의 상관계수는 0.718(유의수준 0.000)로서 모두 유의하게 나타났다. 다중회귀분석 결과, 3번 수평집수정과 달리 곡률계수만이 모형의 독립변수로 적합한 것으

로 나타났으며, 모형의 설명력은 0.515로 증가되었다. 이와 같은 차이는 두 지점의 층적층 입자 분포에서 기인하는 것으로 판단되며, 상대적으로 균질한 입자로 구성된 8번 수평집수정에서 모형의 설명력이 높게 나타났다.

$$DV_{w8} = \frac{11.451 + 9.889 \times C_g}{2} \quad (2)$$

여기에서,  $DV_{w8}$ 는 8번 수평집수정에게 적합한 모형으로서 단위는 min/m이다.

언급한 바와 같이 2개 지점의 층적층 입자 특성(8번이 상대적으로 조립질임)이 상이하기 때문에, 보다 포괄적인 입자 조건에 적합할 수 있도록 두 지점 자료를 통합한 모형을 검토해 보았다(Table 3c). 통합 모형의 경우, 심도별 입도분석 결과는 모형의 독립변수로 고려되지 못하나 균등계수와 곡률계수는 모두 독립변수로 포함되었다. 단, 모형의 설명력이 0.361로 8번 수평집수정의 경우에 비하여 다소 낮아졌음을 알 수 있다.

$$DV_i = \frac{13.193 + 0.381 \times C_u + 6.266 \times C_g}{2} \quad (3)$$

여기에서,  $DV_i$ 는 세립 및 조립질 매질의 혼재된 지층 조건을 고려한 모형으로서 단위는 min/m이다.

이상 개발된 수평집수정 굴착을 추정 식을 5번 및 7번 수평집수정을 대상으로 적용성을 검토해 보았다(Table 4). 5번 수평집수정은 약 20m 지점까지는 실트질 모래 내지 중조립 모래로 구성되나 이후 50m까지는 점토 내지 실트질 모래가 주로 분포하고 있으며( $D50 = 0.64$ ), 7번 수평집수정 구간은 자갈질 모래, 중조립질 모래, 실트질 모래 등이 분포하여 5번에 비하여 굵은 입자가 발달하고 있다( $D50 = 1.88$ ). 5번 및 7번 수평집수정에 대해서는 굴착시 심도별 시료( $D85 \sim D10$ )를 채취하였으며, 균등계수와 곡률계수의 평균값을 구하여 상기 식 (3)에 적용하였다.

7번 수평집수정의 굴착 시간 추정 결과는 5번의 경우에 비하여 실제 현장에서 측정된 굴착 시간과 보다 유사한 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 3번과 8번 수평집수정에서도 마찬가지로, 세립질이면서 분급이 불량한 경우에는 굴착 시간 추정에 오류가 상대적으로 클 수 있다. 이는 세립질 입자로 주로 구성된 지층에 극세립질 및 조립질 등의 크기가 다양한 입자를 다수 포함하는 경우에는 회전식 굴착 장비의 굴착력이 영향을 받기 때문으로 보인다. 4개 수평집수정에 대한 굴착 속도 추정식의 적용 결과, 균등계수가 큰 경우에는

**Table 3.** Linear regression model for estimating drilling velocity in horizontal wells.

(a) Well No. 3

Model	Unstandardized coefficients		Standardized coefficients	t	Sig.
	B	Std. error	Beta		
Constant	22.635	4.580		4.942	0.000
Cu	0.353	0.137	0.474	2.582	0.017

(b) Well No. 8

Model	Unstandardized coefficients		Standardized coefficients	t	Sig.
	B	Std. error	Beta		
Constant	11.451	3.508		3.264	0.003
Cg	9.889	1.999	0.718	4.947	0.000

(c) Sum of two wells

Model	Unstandardized coefficients		Standardized coefficients	t	Sig.
	B	Std. error	Beta		
Constant	13.193	3.702		3.564	0.001
Cu	0.381	0.098	0.460	3.877	0.000
Cg	6.266	2.211	0.336	2.384	0.007

**Table 4.** Drilling velocity estimated using Equation (3).

Wells	Cu <sub>avg</sub>	Cg <sub>avg</sub>	D50	Estimated velocity (min/m)	Estimated total period (hr:min)	Actual velocity (min/m)	Actual total period (hr:min)	Discharge (m <sup>3</sup> /d)
No.3	27.89	1.02	0.71	15.10	12:20	16.92	13:49	900
No.5	41.54	1.75	0.64	19.99	12:40	12.50	7:51	720
No.7	22.37	1.58	1.88	15.81	12:23	15.32	12:00	1,320
No.8	16.17	1.48	1.43	14.33	11:57	13.38	11:09	2,800

추정식의 정확성이 떨어지는 것으로 나타났으나, 조립질이면서 균등계수가 작은 경우에는 상대적으로 유용하게 활용될 수 있는 것으로 파악되었다.

**토론 및 결론**

본 연구에서는 2개 수평집수정의 자료를 활용하여 입자의 특성에 따른 회전식 수평집수정 굴착 공법의 굴착 속도를 추정하는 방안을 제안하였다. 개발 대상 지역의 충적층이 세립질이면서 균등계수가 큰 매질의 경우에는 굴착 속도가 상대적으로 느리고 굴착을 추정식의 정확성이 떨어지는 반면에, 조립질이면서 균등계수가 작은 경우에는 그 반대의 경향을 보이고 있다. 이와 같은 결과는, 안성천과 같이 중소규모 하천에서 세립질 입자가 주 퇴적층인 경우에는 조립질 입자가 혼재되어 균등계

수가 큰 특성을 보여 수평집수정 굴착 과정에 다양한 입자를 만나게 되므로, 해당 수평집수정의 평균 균등계수를 활용하여 굴착 속도를 추정하는 것은 상대적으로 어려움을 알 수 있다. 따라서, 중소규모 하천의 세립질이 분포하는 구간의 수평집수정 굴착 계획 수립시에는 보다 많은 시추 및 분석 자료를 활용해야 굴착시 예상하지 못하는 문제점을 사전에 차단하고 보다 정확한 공정 관리가 가능해 짐을 보여준다. 또한, 충적층이 조립질로 구성되고 균등계수가 작은 경우에는 상대적으로 적은 정보로도 비교적 정확한 시공 일정 수립이 가능함을 보여준다.

본 연구는 안성천이라는 중소규모 하천에서 진행된 만큼, 현재 대하천을 중심으로 추진되는 강변연과수 개발 현장에 본 연구 결과를 적용하기 위해서는 대하천 주변에서의 굴착 과정의 정보를 분석하여 보다 개선된

추정식을 개발해 나갈 필요는 있겠다. 앞으로 강변여과수 개발과 관련한 수리학 및 수질학적 접근 뿐 아니라 선진화된 시공 및 현장의 체계적 관리를 위하여 설계·시공 관련 기술 개발도 적극 추진해 나가야 하겠다.

## 사 사

본 연구는 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원에서 위탁시행한 물관리연구사업(11기술혁신C05)에 의한 ‘수변지하수활용고도화’ 연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

## References

- Choi, B. K., Koh, D. C., Ha, K., and Cheon, S. H., 2007, Effect of redox processes and solubility equilibria on the behavior of dissolved iron and manganese in groundwater from a riverine alluvial aquifer, *Economic and Environmental Geology*, 40(1), 29-45 (in Korean with English abstract).
- Kim, B. W., Kim, G. B., and Kim, G. Y., 2012, Change of hydraulic characteristics due to well drilling and well development in an unconsolidated aquifer, *The Journal of Engineering Geology*, 22(1), 27-37 (in Korean with English abstract).
- 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., Kim, B. W., and Kim, S. Y., 2010, Improvement of well efficiency through well development in a pumping well, *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 15(1), 39-49 (in Korean with English abstract).
- Kim, G. B., Kim B. W., Shin S. H., and Park J. H., 2009, Iron and manganese removal through well development at river bank filtration site, *The Journal of Engineering Geology*, 19(3), 385-396 (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, 1996, Report on the Groundwater Survey for the Alluvial Regions in Korea, Daejeon, 46-65 (in Korean).
- K-water, 2008, Manual for a Technology of Riverbank Filtration System, Daejeon, 237p (in Korean).
- Lee, M. J., Park, J. H., and Kim, G. B., 2012, In situ iron-manganese removal by the oxygenized water injection at the river bank filtration site, *Journal of the Geological Society of Korea*, 48(6), 503-519 (in Korean with English abstract).
- Ministry of Environment (ME), 2009, Investigation Report on the Feasibility of Riverbank Filtration Development, Seoul, 796p (in Korean).
- Ministry of Land, Infrastructure, and Transport (MOLIT), 2014, Research Report on the Development of Large Capacity of Riverbank Filtration System at the Riverside, Seoul, 372p (in Korean).
- Vukovic, M. and Soro, A., 1992, Determination of hydraulic conductivity of porous media from grain-size distribution, Water Resources Publications, LIC, Highlands Ranch, Colorado.

## 김규범

K-water연구원

대전광역시 유성구 유성대로 1689번길 125

(전민동)

Tel: 042-870-7600

E-mail: gbkim@kwater.or.kr

## 이정운

(주)인텔리지오

서울시 구로구 디지털로 288 2004호

(대릉포스트타워)

Tel: 02-2082-2361

E-mail: kp79kp@nate.com

## 이치형

(주)인텔리지오

서울시 구로구 디지털로 288 2004호

(대릉포스트타워)

Tel: 02-2082-2361

E-mail: hyungnom@dreamwiz.com