

방사형 집수정의 적정 설계를 위한 조사 물량 제안

최명락¹ · 김규범^{2*}

¹대전대학교 일반대학원 방재학과

²대전대학교 건설안전방재공학과

A Proposal for the Number of Investigation Wells for Optimal Radial Collector Well Design

Myoung-Rak Choi¹ · Gyoobum Kim^{2*}

¹Department of Disaster Prevention, Graduate School of Daejeon University

²Department of Construction Safety and Disaster Prevention, Daejeon University

ABSTRACT

In general, the estimation of optimum yield for the radial collector well is determined by the empirical equation or numerical modeling, in which hydraulic conductivity of the aquifer is a main influence factor. Hydraulic conductivities of 164 soil samples collected from boreholes and horizontal wells (average length: about 50 m) installed during well construction in the Anseong stream were drawn in two-dimensional map by the Kriging method and utilized in this study. Hydraulic conductivity analyses by Representative Elementary Count (REC) indicated the average hydraulic conductivity is similar to that of the pumping test when the number of samples reaches about 1,000, which correspond to 1,000 m². Pumping test was also conducted at 1 pumping well and 13 observation wells to estimate hydraulic conductivities at each observation well. REC analysis indicated that the average value of hydraulic conductivity calculated from at least four observation wells is valid as a representative value. The overall result suggested that multiple observation wells or multiple pumping-observation well systems that are located within the range of horizontal wells should be utilized to properly estimate the representative hydraulic conductivity values and the yield of a radial collector well.

Key words : Radial collector well, Representative Elementary Count, Hydraulic conductivity, Investigation well

1. 서 언

인공함양 방법 중 하나인 강변여과(riverside infiltration)는 강변 또는 호소변에 평행하게 일정한 간격의 우물 또는 수평집수관 등의 취수시설을 설치하여 강변 충적층의 자연정화 효과를 이용하여 취수하는 방식으로 국내의 경우 창녕군, 합천군, 의령군 등 36개소가 개발 대상지로 검토된 바 있다(K-water, 2002).

강변여과수 개발에서 대수층의 수리특성은 취수량과의

관계에서 매우 중요한 요인으로 작용한다. 방사형 집수정 방식의 강변여과 설계시 취수량 예측은 경험식을 이용하거나 Modflow 등의 수치모델을 활용하는데, 이 때 취수량 예측에 있어 수리전도도가 큰 영향을 미치게 되므로 개발대상 지역의 대표 수리전도도의 산정이 중요하다. 방사형 집수정을 대상으로 Milojevic, Kordas, Babac 등의 경험식을 이용한 취수량 추정의 적정성 평가 연구에 따르면, 각 방법별로 수리전도도와 취수량은 비례하는 것으로 평가된 바 있다(Oh et al., 2012, Kim et al., 2014, Hong et al., 2016, Kim et al., 2018). 우리나라의 경우 방사형 집수정의 설계시 조사비용을 고려하여 최소한의 양수 시험 또는 시추조사에 의하여 수리상수를 추정하고 이로부터 적정 취수량을 산정하고 있으나, 최적의 수리전도도를 추정하기 위한 적정 물량에 대한 기준이 마련되어 있지 않은 실정이다.

주저자: 최명락, 대전대학교 일반대학원 방재학과 건설안전방재공학전공, 박사과정

*교신저자: 김규범, 대전대학교 건설안전방재공학과, 교수
Email: geowater@dju.kr

Received : 2020. 3. 23 Reviewed : 2020. 5. 12 Accepted : 2020. 6. 5
Discussion until : 2020. 9. 30

본 연구에서는, 안성천에 설치된 방사형 집수정의 설계, 시공시 채취되었던 수평집수관 및 수직정의 토양 시료로부터 추정된 수리전도도의 분포 자료 및 양수시험 자료를 이용하여, 대표 수리전도도를 결정하기 위하여 대표요소 개수(representative elementary count, REC)에 기초한 적정 조사공의 개수를 제안하고자 하였다.

2. 연구 방법

연구에 사용된 입도 분석 자료는 안성천의 방사형 집수정 굴착시 채취된 수평집수관의 2 m 간격의 토양 시료 156개, 관측정 굴착시 채취된 토양 시료 8개 등 총 164 개로서, 수리전도도는 Carman(1956) 및 Slichter(1898)의 식(1), (2)에 의하여 추정된 후 두 결과의 평균을 구하여 사용하였다(Fig. 1; Choi et al., 2019).

$$K = \frac{g}{\nu} \times 8.3 \times 10^{-3} \times \left[\frac{n^3}{(1-n)^2} \right] \times d_{10}^2 \quad (1)$$

$$K = \frac{g}{\nu} \times 1.0 \times 10^{-2} \times n^{3.287} \times d_{10}^2 \quad (2)$$

여기에서, K 는 수리전도도(L/T), g 는 중력가속도(L/T²), ν 는 동점성계수(L²/T), n 은 공극율, d_{10} 은 유효입경(L)이다. Carman 식은 중립질 토양이고 유효입경이 3 mm 이하 일 때 사용할 수 있으며 Slichter 식은 유효입경이 0.01~5 mm 일 때 사용할 수 있다. 이들 자료는 단순-크리깅(linear variogram)을 통하여 2차원적 분포로 도시하여 1 m 간격의 약 35,000개의 데이터를 생성하였으며, 분석을 위한 표본 추출의 기본 자료로 활용하였다. 위 식을 이용하여 추정된 연구지역 수리전도도의 공간적 분포는 방사형 집수정을 기준으로 북쪽과 남서쪽이 북서쪽과 동

쪽보다 높은 특성을 보인다. 수리전도도의 원자료 및 크리깅에 의하여 생성된 자료의 히스토그램이 유사한 형태로 작도되어 합리적인 표본 추출이 가능함을 보여준다(Fig. 2).

연구 지역에는 2015년에 수평집수관 7개를 갖는 방사형 집수정 1기가 설치되었으며, 지표로부터 6.5 m 하부의 모래자갈층에 위치한 수평집수관은 직경 200 mm, 길이 30~70 m로 굴착되어 있다(Choi et al., 2019).

방사형 집수정의 평면상 규모별로 적정 조사공의 수가 달라질 수 있으므로, 상기 수리전도도 분포도를 반경 20 m, 30 m, 40 m, 50 m, 60 m, 70 m로 분류하여 분석 영역을 설정한 후 각 영역내에서 임의의 표본을 추출하도록 하였다(Fig. 1 참조). 표본 추출은 임의의 지점 100개 부터 2,000개까지 점차 증가시키면서 추출한 후 평균 수리전도도를 산정하였으며, 각 반경별로 각기 다른 케이스를 10 회 반복하여 추출하였다. 이와 같이 표본의 수와 평균 수리전도도의 분포를 도시한 후 대표요소체적(representative elementary volume, REV)과 유사하게 대

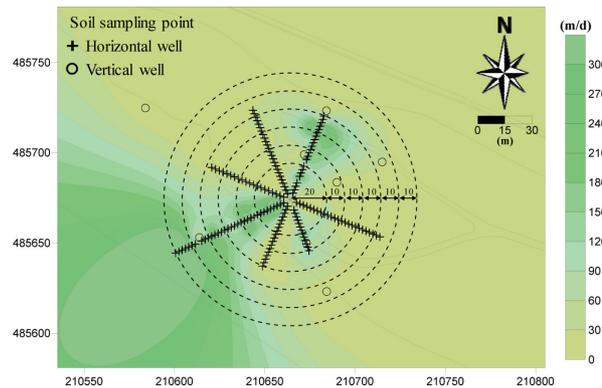
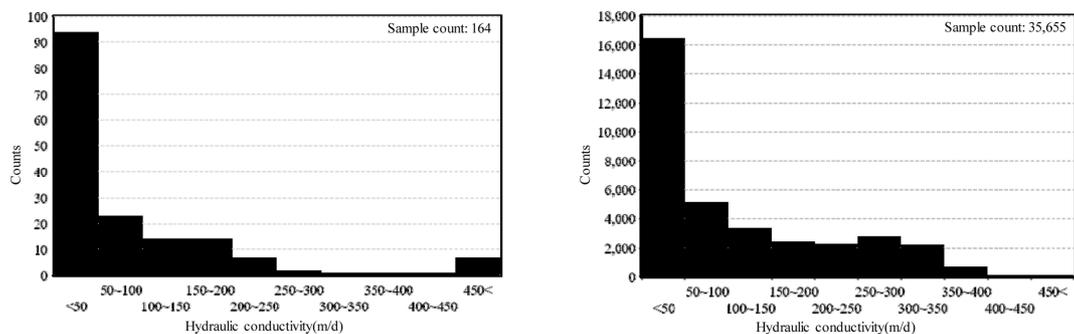


Fig. 1. Location of soil sampling point around the radial collector well: contouring for a distribution of hydraulic conductivity and dotted circles for target area with diverse radius.



(a) Original data (b) Kriging data

Fig. 2. Comparison of two histograms for hydraulic conductivity: (a) original and (b) kriging result.

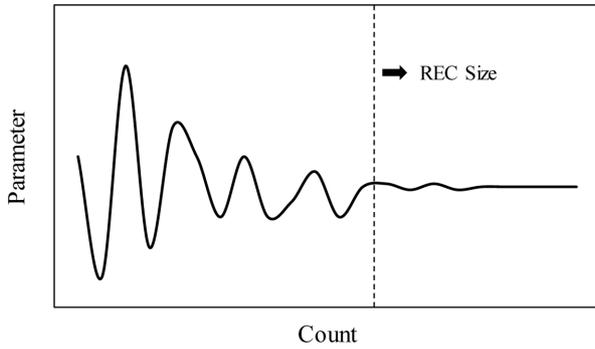


Fig. 3. Concept of representative elementary count.

표요소개수(REC)의 개념을 적용하여 적정 표본의 수를 결정하였다(Katagiri et al., 2020). 대표요소개수(REC)는 대표요소체적과 유사하게 전체를 대표하는 값을 산출할 수 있는 가장 작은 면적에 해당하는 것으로서 표본의 크기를 증가시킬수록 일정한 값으로 수렴하여 안정화되기 시작할 때의 값을 추출하는 방법이다(Fig. 3; Kim et al., 2004).

3. 적정 조사 수량 분석

각 분석영역에 대하여 표본의 수에 따른 평균 수리전도도를 도시하였다(Fig. 4a). 반경 20 m 및 30 m 분석 영역의 경우는 평균 수리전도도가 각각 약 60.8 m/day 및 52.9 m/day로서 실제 양수시험에서 얻어진 수리전도도 41.6 m/day와 비교할 때 지나치게 높은 값을 보였는데(Kim et al., 2018), 이는 표본의 대표성이 결여되었음을 의미한다. 또한, 최소 30 m 최대 70 m의 수평집수관 7개로 구성된 방사형 집수정의 규모를 고려할 때 반경 20~30 m 이내의 입도 분석 자료로는 대수층의 전반적인 특성을 설명하는데 부족함을 의미한다.

반면에, 반경 40 m와 50 m인 경우의 평균 수리전도도는 약 44.7 m/day 및 42.9 m/day로서 양수시험 결과와 유사함을 보여준다. 양수시험 결과와 약간의 차이가 존재하는 것은 입도분석에서 구해진 수리전도도의 원 자료와 크리깅에 의하여 생성된 자료의 분포에 미세한 차이가 존재하기 때문으로 보인다(Fig. 2 참조). 그러나, 반경 60 m 및 70 m의 평균 수리전도도는 약 37.2 m/day 및 35.1 m/day로 나타나 양수시험 결과보다 작은 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는, 반경 40~50 m는 방향별 수평집수관의 분포 범위를 대부분 포함하는 영역인 반면에, 그 이상의 범위에서는 1개 수평집수관을 제외하고는 굴착되어 있지 않고 토양 시료도 채취되지 않았기 때문에 대표성이 낮아

지게 된다(Fig. 1 참조). 따라서, 방사형 집수정의 수평집수관의 규모 및 분포를 고려하여 토양 시료 채취 및 입도 분석을 수행해야 상대적으로 적절한 수리전도도 추정 가능성이 가능함을 보여준다.

따라서, 본 현장과 같이 수평집수관이 약 50 m 정도 굴착되어 있는 경우에는 이 범위내에서 약 1,000개 정도의 자료를 취득하면 표준편차가 2 m/day 이내로서 표본의 균질성이 확보되고 수리전도도가 의미 있음을 알 수 있다(Fig. 4b). 그러나, 실제 현장에서 토양 입도분석에 의한 수리전도도를 수 백 개 이상 취득하는 것은 거의 불가능하다. 따라서, 이들 입도분석에 의한 평균 수리전도도의 분포 특성과 실제 양수시험 결과와의 비교를 통하여 적정 수리전도도를 산정하는데 필요한 양수시험용 우물 및 관측정의 수 및 상응하는 분석 영역에 대하여 검토해 보았다.

한편, 방사형 집수정의 수직 우물통 인근에서 설계 단계에서 양수시험을 실시하였는데, 양수정 1개소에서 취수하고 20~30 m 내에 위치한 13개 관측정에서 지하수위를 측정하였으며, 이들 각 관측정에서의 수위 자료를 토대로 각 지점별 수리전도도를 산정하였다(Fig. 5). 양수시험에 의한 수리전도도는 입도분석과 달리 양수정의 영향권 내에 위치한 대수층의 평균적인 수리특성을 반영하는 것으로서 양수정과 관측정 사이의 대수층 분포 특성에 의하여 지배를 받는다. 각 관측정에서 분석된 수리전도도는 방향별, 지점별로 다양한 값을 보이고 있다. 현장 양수시험 시 적정 관측정의 개수를 검토하고자 인근 13개 관측정의 수리전도도 자료를 이용하여 위와 동일한 방법으로 임의의 지점 1개부터 12개까지 표본을 추출하였으며, 각기 다른 케이스를 10회 반복 추출하였다. 적정 개수 추출 결과 본 양수시험에서는 4개 정도의 관측정이 운영된다면 추정된 평균 수리전도도가 40.3 m/day를 기준으로 표준편차가 약 3 m/day 이내로 나타나 전체 평균과 유사해 지는 것으로 평가되었다(Fig. 6). 또한, 이 경우 각 방향별로 수리전도도를 추정하는 것이 가능해 지기 때문에 수평집수관의 설계에 도움이 된다.

상기에서 입도 분석에 의한 적정 개수 1,000개에 대한 평균 수리전도도를 단일 영역에서 추출한다고 가정하면 가로 33 × 세로 33 m 범위에 해당된다. 한편, 1개 양수정 주변에 4개 관측정의 위치와 방향이 매우 다양할 수 있는데, 두 방향 이상에 4개가 존재하는 경우(최소 반경 약 7 m, 최대 반경 약 18 m) 또는 단일 방향으로 4개가 존재하는 경우(최소 반경 약 15 m, 최대 반경 약 20 m) 등을 평균적으로 검토하면 1개 양수정과 4개 관측정이 차지하는 면적은 반경 약 15~16 m 정도로 고려할 수 있다

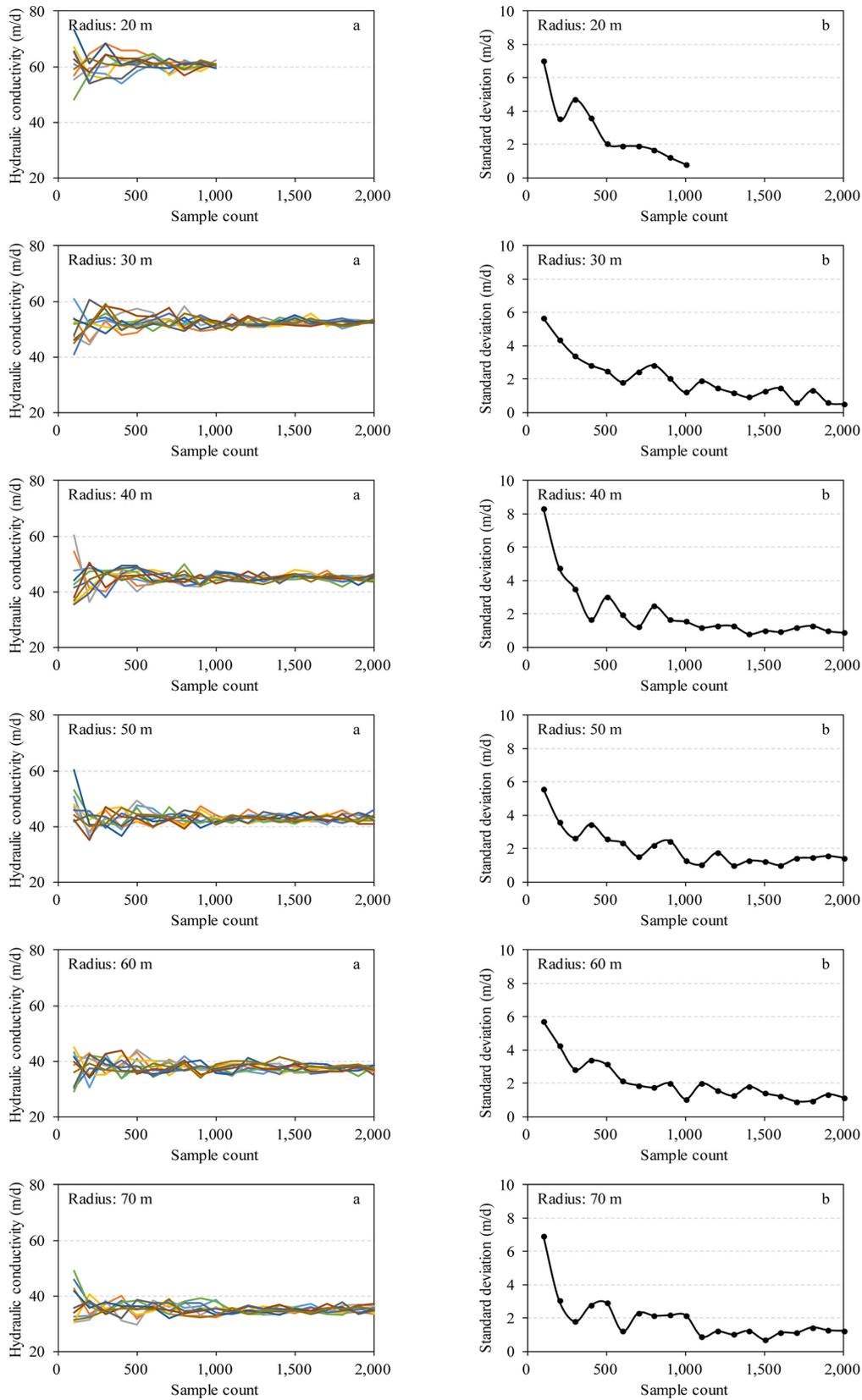


Fig. 4. Distribution of the relationship between hydraulic conductivity and sample count for each target size: a) 10 cases, b) standard deviation of 10 cases.

(Fig. 5 참조). 이를 일반화하면, 1,000개의 수리전도도 평균값이 의미하는 면적은 평균적으로 반경 약 15~16 m 지점에 4개의 관측정을 갖는 양수시험 시 구해진 수리전도도의 평균과 유사함을 알 수 있다. 이 면적은 1,000개 수리전도도가 차지하는 단일 면적의 약 70~80%에 해당하는 것으로서, 양수 시 지하수의 3차원 흐름이 발생하는 영역이 관측정 외곽에도 존재하고 곡선 흐름이 존재하는 점을 고려할 때 적정한 것으로 파악된다.

그러나, 실제 강변여과수의 조사 단계에서 수행하는 양수시험은 양수정 1개 및 관측정 1개로 이루어지는 경우가 일반적이다. 따라서, 대표성을 갖는 정확한 수리전도도를 추출하기 위해서는 1) 1개 양수정과 4개의 관측정으로 구성된 1 세트의 실험 체계가 기본적으로 요구되며, 대안으로서 2) 양수정 1개와 관측정 2개로 구성된 2 세트의 실험 체계, 또는 3) 양수정 1개와 관측정 1개로 구성된 4 세트의 실험 체계 등이 가능하며, 이로부터 산정된 다수의 수리전도도가 필요하다. 방사형 집수정의 취수량은 수

평집수관의 설계에 의하여 영향을 받게 되는데, 보다 정확한 설계를 위해서는 각 수평집수관 주변의 대수층 수리특성의 이방성이 평가되어야 한다. 1개 양수정에 의한 수리전도도 추정 결과는 이와 같은 방향별 대수층의 수리특성을 구분할 수 없으나, 다수의 관측정 및 양수정은 방향별 수리특성을 제공해 주어 이방성을 파악할 수 있도록 함으로서 보다 정확한 수평관의 설계를 가능하게 한다.

이상 결과를 종합해 보면,

- 1) 방사형 집수정의 수평집수관의 설치 범위를 고려하여 토양 시료 채취 및 입도분석에 의한 수리전도도 추정이 필요한데, 각 방향별 수평집수관의 평균 길이가 지배하는 면적 내에서 토양 시료 분석이 수행되어야 함을 보여주고 있다.
- 2) 또한, 이 지배 면적 하에서 최대한 많은 수의 입도 분석이 가능할 수 있으나, 조사단계의 수직정에서 충분한 토양 시료를 얻는 것은 비용적인 측면에서 거의 불가능하다. 따라서, 적정 수준의 양수정과 관측정을 설치하여 평균 수리전도도를 구하는 것이 필요하다.
- 3) 이 때 양수정과 관측정을 각각 1개씩 굴착하여 시험하는 것은 산정된 수리전도도의 대표성이 매우 낮을 것으로 추정되므로, 최소 4개의 관측정을 설치하거나 양수정과 관측정으로 구성된 다수의 실험 세트를 설치하여 실험 후 평균을 취하는 것이 바람직한 것으로 나타났다.

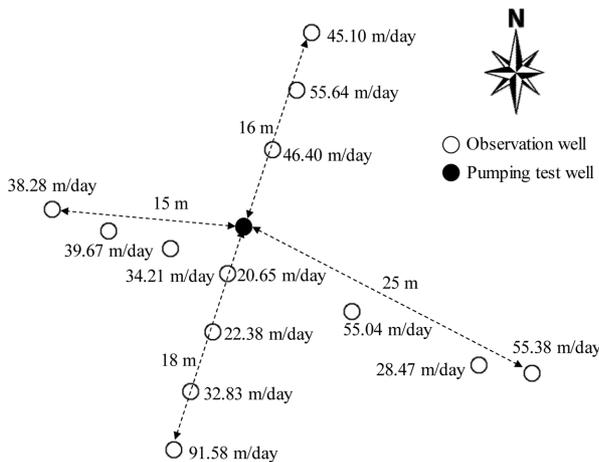


Fig. 5. Location of pumping well and observation wells and their hydraulic conductivities in the study area.

4. 타 지역 적용성

한편, 양수정과 관측정의 구성을 달리하는 경우에도 유사한 결과를 얻을 수 있는지 평가하기 위하여 창녕군 증산리 지역에서 실시한 양수시험 자료를 분석하였다 (Taeyoung Construction, 2015). 이 지역에는 1개 양수정

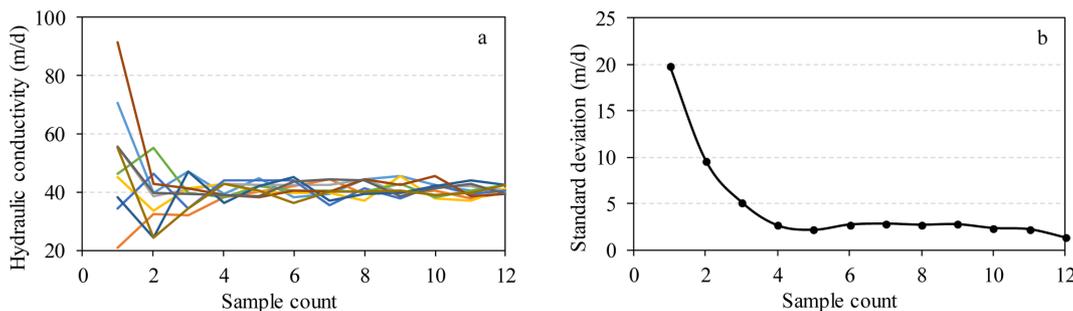


Fig. 6. Distribution of the relationship between hydraulic conductivity and the number of monitoring wells in the study area: a) 10 cases, b) standard deviation of 10 cases.

과 2~5 m 이격된 지점의 5개 관측정이 설치되었으며, 장기양수시험 및 회복시험 등을 통하여 결정된 수리전도도는 65.2 m/day로 평가되었다. 안성천의 사례와 유사하게 임의의 1개부터 5개까지 수리전도도 표본을 추출한 후 평균을 구하였으며 총 10회 반복 수행하였다(Fig. 7). 임의의 4개 수리전도도를 추출한 경우는 평균 64.0 m/day를 기준으로 표준편차 3.7 m/day 이내의 값을 보여 당초 수리전도도와 유사한 값을 보이고 있다(Fig. 8). 그러나, 이 값은 강변여과수 사업 진행과정에서 추가적인 양수시험 등을 통하여 결정된 수리전도도 71.3 m/day와는 차이를 보이고 있다. 이 원인은 처음 실시하였던 양수시험시 양수정과 관측정의 거리가 가까워 지배 면적이 작은 것이 영향을 미친 것으로 보인다. 따라서, 기본적으로는 1개 양수정에 최소 4개의 관측정을 설치하거나 전 절에서 언급한 다수의 양수-관측 세트를 설치하는 것이 필요하며, 증

산리 지역의 경우처럼 관측정의 공간적 영역이 수 m 이내로 좁은 경우는 오차를 발생시킬 수 있기 때문에 수평 집수관의 분포 범위를 고려한 양수시험 설계가 필요해 보인다.

한편, 본 연구는 안성천에 국한된 토양 입도 분포 조건에 대하여 분석한 것으로서, 본 연구 결과를 타 지역에 확대 적용하기 위해서는 표본 추출의 동일성이 검증되어야 하는데, 이를 위하여 타 지역 간의 토양 입도 분포의 유사성을 검토하였다. 안성천에 비하여 수 배 이상 큰 규모의 충적층을 갖는 낙동강 지역인 창녕군 증산리 지역 강변여과수 개발 현장의 토양 입도의 분포 특성을 검토하고자, 방사형 집수정 주변 시추공 20개에서 지표하 31 m 까지 2 m 간격으로 채취된 토양시료 82개의 입도 분석 자료를 이용하여 안성천과 동일한 방법으로 수리전도도를 추정하고 평균값을 산정한 바 있다(Kim et al., 2018). 금회 분석한 안성천의 수리전도도와 창녕군 증산리의 수리전도도에 대한 히스토그램 분포 분석 결과, 두 지역 공히 낮은 수리전도도의 분포가 많이 나타나는 positive skewness 특성을 잘 보이며, skewness 값은 안성천은 2.694, 창녕군 증산리는 2.927로 유사하게 나타났다(Fig. 2 및 Fig. 9). 이와 같은 분포의 유사성은 두 지역에서 유사한 규모의 무작위 표본 추출이 가능함을 보여주고 있으며, 대표요소개수(REC)를 활용한 본 연구의 결과를 타 지역에서도 적용 가능함을 의미한다. 또한, 금회 분석에서는 수직정에서 취득된 토양의 수리전도도가 분석에 활용되었는데, 수평집수관에서 산정된 수리전도도와 수직정의 수리전도도의 분포가 유사한 것으로 평가된 바 있어 다수의 수직정에서 취득된 수리전도도도 활용 가능함을 알 수 있다(Kim et al., 2018).

본 연구에서는 안성천의 사례인 반경 약 50 m 정도의 방사형 집수정을 대상으로 수리전도도 산정에 필요한 토양 시료 채취의 적정 범위 및 조사 물량을 검토하였다.

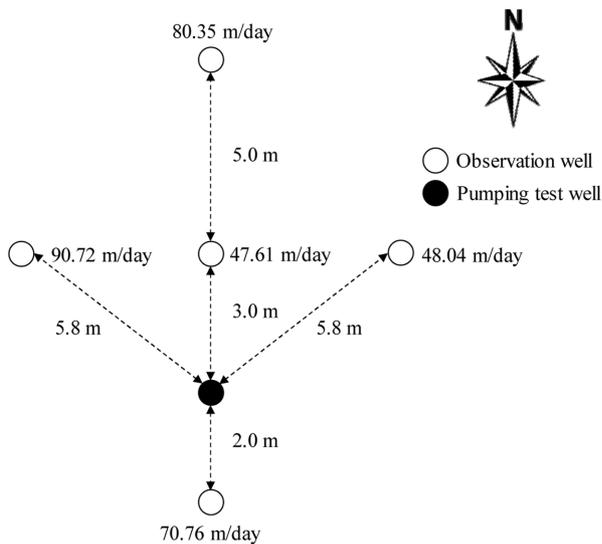


Fig. 7. Location of pumping well and observation wells and their hydraulic conductivities in Changnyeong area.

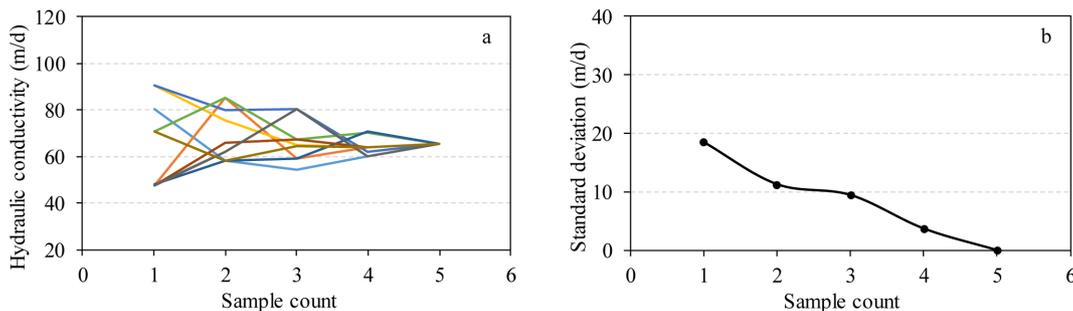


Fig. 8. Distribution of the relationship between hydraulic conductivity and the number of monitoring wells in Changnyeong area: a) 10 cases, b) standard deviation of 10 cases.

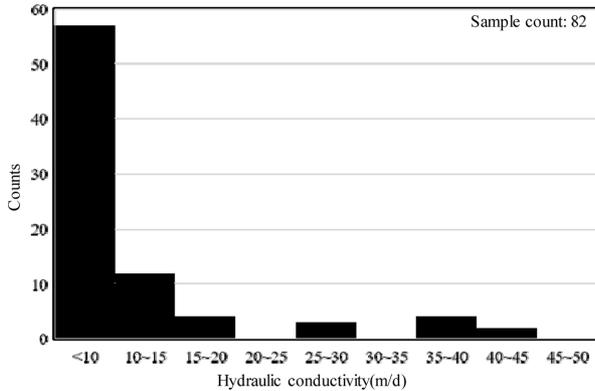


Fig. 9. Histograms of hydraulic conductivity in Changnyeong area (Kim et al., 2018).

본 연구에서는 방사형 집수정의 수평집수관의 규모별로 적정 조사 물량을 제시하기에는 양수시험 자료가 부족하여 수행되지 못하였으나, 국내 대부분의 수평집수관이 70 m를 넘지 않으므로 본 연구 결과를 참고하여 적정 조사 물량을 검토한다면 최적 취수량 산정에 필요한 대표 수리전도도 산정에 효과적일 것으로 판단된다.

5. 토의 및 결론

우리나라는 이상 기뭇 등에 대비한 수원 다변화 정책의 일환으로 대하천을 중심으로 강변여과수 개발 사업이 수행되고 있다. 그러나, 현재까지 강변여과수의 적정 취수량을 평가하기 위하여 필요한 대표 수리전도도를 결정하는 조사 물량에 대한 기준이 마련되어 있지 않다. 사업의 발주 기관 및 수행 시공사 등에서는 예산 절감 차원에서 방사형 집수정 1기당 1개 정도의 양수시험을 수행하고 있는 실정인데, 이와 같은 시험 물량으로는 반경 60~70 m의 방사형 집수정의 양수 영향권 내의 수리특성의 대표값을 구하거나 방향별 이방성을 찾는 것은 용이하지 않다. 따라서 본 연구에서는 대표요소개수 기법을 적용하여 방사형 집수정 설계 시 대표 수리전도도 추출을 위한 적정 조사 개수를 분석하였다. 대표요소개수 기법을 적용하여 적정 조사물량을 추정된 결과 반경 약 50 m의 방사형 집수정 설계 시 1 m 간격의 1,000개의 입도 분석에 의한 수리전도도 평균이 의미 있는 것으로 나타났다. 이 결과와 유사한 정확한 수리전도도를 산정하기 위해서는 최소 양수정 1개에 관측정 4개가 필요한 것으로 분석되었으며, 이를 통하여 방향별 수리전도도의 이방성을 파악하는데 도움이 된다. 따라서, 현재 일반적으로 1개 양수정과 1개 관측정으로 구성된 실험 체계가 현장에서 수행되고 있어

정확한 대표 수리전도도 산정이 어려운 만큼, 위와 유사한 효과를 얻기 위해서는 다수의 시스템(예를 들면, 1개 양수정과 2개 관측정 시스템 2 세트 또는 1개 양수정과 1개 관측정 시스템 4 세트)으로 구성된 현장 실험이 수행될 필요가 있다.

방사형 집수정에 의한 강변여과수의 적정 취수량 산정은 대수층의 수리전도도에 의하여 영향을 받을 뿐 아니라, 방향별 입도 분포 및 수리 특성 등을 반영한 정확한 수평집수관의 설계에 의해서도 영향을 받는다. 따라서, 강변여과수 개발에 있어서 클로킹 등 취수량을 감소시키는 추가적인 요인이 존재하기도 하나, 보다 정확한 설계에 의한 안정적 취수량 확보를 위해서는 조사 단계에서의 대수층의 이방성에 대한 평가가 체계적으로 규명되어야 한다.

사 사

본 연구는 환경부(한국환경산업기술원)의 수요대응형 물공급 서비스사업 과제(상시 기뭇지역의 지하수 최적공급 관리를 위한 IoT 기반 인공함양 및 Well network 기술 개발, #146523)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Carman, P.C., 1956, Flow of gases through porous media. Butterworths Scientific Publications, London.
- Choi, M.R., Lee, H.J., and Kim, G.B., 2019, Relationship between groundwater level changes and aquifer characteristics during pumping a radial collector well, *J. Eng. Geol.*, **29**(3), 279-288.
- Hong, S.W., Song, S.H., An, J.G., and Kim, J.S., 2016, Agricultural Radial Collector Wells in South Korea and Sustainability, *J. Eng. Geol.*, **26**(3), 331-337
- Katagiri, J., Kimura, S., and Noda, S., 2020, Significance of shape factor on permeability anisotropy of sand: representative elementary volume study for pore-scale analysis. *Acta Geotechnica*. <https://doi.org/10.1007/s11440-020-00912-0>.
- 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. *J. Geo. Soc. Korea*, **50**(3), 401-407.
- Kim, G.B., Lee, H.J., and Choi, M.R., 2018, Applicability and limitations of groundwater yield estimation equations for radial collector wells, *J. Eng. Geol.*, **28**(3), 443-453.
- Kim, G.B., Lee, J.Y., and Lee, K.K., 2004, Application of representative elementary area (REA) to lineament density analysis

for groundwater implications, *Geo. Sci. J.*, **8**(1), 27-42.

K-water, 2002, Report on the development of riverside filtration and its amount, 56p.

Oh, S.H., Jeong, J.H., and Park, S.G., 2012, Evaluation of pumping capacity of radial collector wells using Milojevic's equation in the National River Watershed, Korea, *J. Soil Groundw. Envi-*

ron., **17**(3), 10-20.

Slichter C.S., 1898, Theoretical investigations of the motions of groundwater, USGS, 295-384.

Taeyoung Construction, 2015, Geotechnical survey report on the riverside filtration facility construction in the Nakdong River (Section 1), 148p.