방사형집수정의 수평집수관에서 지질특성과 취수량의 상관관계 분석

김태형^{1*} · 정재훈¹ · 김 민¹ · 오세형¹ · 이재성¹

¹펜아시아워터 수자원연구부

Analysis of the Correlation between Geological Characteristics and Water Withdrawals in the Laterals of Radial Collector Well

Tae-Hyung Kim^{1*}, Jae-Hoon Jeong¹, Min Kim¹, Se-Hyoung OH¹, and Jae-Sung Lee¹

¹Division of Water Resources Research, Pan Asia Water Co.

Received 21 April 2014; received in revised form 16 June 2014; accepted 20 June 2014

본 연구에서는 창원시 강변여과수 개발사업(2단계)에서 얻어진 자료들을 이용하여 대수층의 수리전도도와 방사형집수정의 수평집수관에서 산출되는 유량과의 상관관계를 규명하고자 하였다. 연구지역인 낙동강 중하류 모래자갈층에서 수평적으로 채취한 미고결 퇴적물의 시료를 이용하여 경험식에 의한 수리전도도를 산정하였다. 여러 경험식을 이용하여 연구지역에서 수리전도도를 산정한 결과, Beyer식에 의한 수리전도도가 가장 적합한 것으로 판정되었다. 산정된 수리전도도는 0.083 ~ 0.264 cm/s의 범위, 평균 0.159 cm/s로 나타내고 있어 연구지역의 대수층 특성은 모래자갈층에 투수성이 양호한 것으로 나타났다. 산정된 수리전도도와 실측자료에 의한 스크린 내 지하수의 유입속도 및 유량과의 상관관계를 분석하고자 회귀분석을 실시하였다. 회귀분석 결과, 수리전도도와 지하수의 유입속도 및 유량은 약 72%의 높은 상관관계를 가지는 것으로 나타났고, 각 변수들 간에 실측자료와의 검증에서도 약 72%가 일치하는 것으로 분석되어 선형 회귀식은 높은 적합성을 나타내었다. 본 연구의 결과로서 선형 회귀식을 이용하여 수리전도도에 의한 방사형집수정의 수평집수관에서 산출되는 유량의 추정이 가능하고, 연구지역과 유사한 대수층에서 적용이 가능할 것이라고 사료된다.

주요어 : 강변여과수, 방사형집수정, 모래자갈층, 입도분석, 수리전도도

This study was performed to investigate the correlation between hydraulic conductivity and the flow rate of an aquifer, with the flow rate calculated from the laterals of the radial collector well using data obtained by the development project of riverbank filtration (Second Phase) in Changwon City. The hydraulic conductivity was empirically calculated from unconsolidated sediments collected from a sandy gravel layer along the middle-to-downstream sections of the Nakdong River. The Beyer equation produced the most suitable hydraulic conductivity from the various empirical formulas employed. The calculated hydraulic conductivity ranged from 0.083 to 0.264 cm/s, with an average value of 0.159 cm/s, suggesting that the aquifer in the study area possesses a high permeability with a good distribution of sandy gravel. The relationship between the calculated hydraulic conductivity in the aquifer and the entrance velocity into the screen, the flow rate was analyzed through the linear regression analysis. From the result of regression analysis, it showed that the hydraulic conductivity and the entrance velocity into the screen and the flow rate have a linear regression equation having about 72% of the high correlation. The result of verification in the measured data between each variable showed a high suitability from being consistent with the approximately 72% in the linear regression analysis. This study demonstrates that the groundwater flow rate can be estimated within the laterals of the radial collector well using a linear regression equation, if the hydraulic conductivity of the aquifer is known. This methodology could thus be applicable to other aquifers with hydraulic conductivity and permeability parameters similar to those in the present study area.

Key words : riverbank filtration, radial collector well, sandy gravel layer, grain size analysis, hydraulic conductivity

*Corresponding author: thkim9795@gmail.com

© 2014, 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 취수원수의 대부분을 차지하는 지표수는 수량 및 수질변화에 민감하고, 수질사고 발생 시 능동적인 대처가 힘들다. 하지만 지하수는 지표수보다 수질이 양호하며, 연중 일정한 수온을 유지하고, 무엇보다도 오염물질 유입에 따른 충격부하를 저감시키는데 효과적이다. 강변여과수(riverbank filtration)는 수변 모래층에서 지하수 형태로 취수해 정수하는 방법으로 연중 수량과 수질의 변동이 적고 모래층을 통과하는 동안 미생물의 분해, 흡착 등에 의해 유해물질이 상당량 제거되는 장점 등이 있다. 하지만 과잉 양수시 대수층의 지하수위 하강에 인한 지반침하 문제와 토양 중에 포함되어 있는 중금속 등의 용출이 우려되는 등 앞으로도 많은 조사와 연구가 필요하다.

환경부 상수원관리규칙 제3조에 의하면 ‘수원의 구분’은 하천수, 복류수, 호소수, 지하수(표층지하수, 심층지하수), 해수, 강변여과수로 규정하고 있고, 강변여과수는 하천, 호소 또는 그 인근지역의 사력층을 통과한 물이라고 정의하고 있다(시행 2013.07.26.). Fig. 1은 복류수, 지하수, 강변여과수 등 수변지역에서 다양한 취수방식의 모식도를 나타내고 있다. 방사형집수정(radial collector well)의 구조는 우물통(caisson)에 여러 개의 수평집수관(lateral)으로 구성되어 있으며, 수평집수관의 스크린을 통해 지하수가 유입된다(Fig. 1). 방사형집수정은 수직정도에 비해 대수층과의 접촉 면적이 넓어서 취수의 영향이 고루 분산되어 대수층의 수위 강하가 적게 일어나며, 수평집수관을 통한 지하수의 유입 속도가 느려 스크린에 이물질이 상대적으로 적게 부착되므로 우물재개발 주기가 길어지는 장점이 있다(Lee et al., 2010).

연구지역인 창원시는 전국에서 최초로 2001년에 북면과 대산면에 강변여과수 취수장을 건설하여 운영하고 있다. 2005년 12월에 60,000 m³/day 규모(1단계 사업)의 취수장을 준공하였고, 이후 2013년 2월에 60,000 m³/day 규모(2단계 사업)의 취수장을 추가로 설치하여 수돗물이 부족한 시가지에 양질의 수돗물을 공급하고 있다(Changwon City, 2014).

국내에 강변여과수 관련하여 많은 연구들이 보고되어 있고, 연구지역과 관련하여 선행 연구들은 다음과 같다. 경남 창원시 대산면 강변여과수 취수장 주변에 대해 수리지질 특성(Hamm et al., 2002; Cheong et al., 2008), 지하수위 변동 특성(Cheong et al., 2003; Lee et al., 2004), 수질 특성(Hyun et al., 2006), 취수가능량 평가

Fig. 1. Conceptual diagram of riverbank filtration and the structure of a radial collector well.

(Chung et al., 2004), 지하수 유동 모델링(Hamm et al., 2005) 등의 연구가 있고, 인근에 위치한 북면 강변여과수 취수장 주변에 대해서도 지하수 유동 모델링(Hamm et al., 2004) 등의 다양한 연구가 수행되었다.

강변여과수의 개발에서 대수층의 수리지질 특성은 취수량의 확보에 있어 매우 중요한 부분으로서, 수리지질의 특성분석을 통해 최적 개발지를 선정하고, 지질 특성에 맞는 적정 설계를 통해 목표 취수량을 결정해야 한다. 그렇지 않을 경우 목표 취수량을 만족하지 못하거나 설계상의 문제로 인하여 시공에 상당한 비용이 소요되어 많은 경제적 손실이 불가피하다. 하지만 간접취수 시설인 방사형집수정에서 수평집수관은 대수층에 수평적으로 설치되므로 대수층의 수평적 지질 특성을 고려하지 않는다면 목표 취수량을 확보하기가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 창원시 강변여과수 개발사업(2단계)에서 얻어진 실측자료들을 이용하여 대수층의 수평적 수리지질 특성과 방사형집수정의 수평집수관에서 산출되는 유량과의 상관관계를 규명하고자 하였다. 이러한 연구는 강변여과수 개발지역에서 대수층의 수리지질 특성에 따라 목표 취수량을 결정하는데 있어 유용한 방법으로 사료된다.

지형 및 지질현황

연구지역은 행정구역상 경상남도 창원시 의창구 대산면 일동리(방사형집수정 #1~#4)와 동읍 노연리(방사형집수정 #5)에 해당되며, 창원시 북쪽에 위치하여 밀양시와 인접한 지역에 위치하고 있다(Fig. 2). 지형적으로는 남쪽으로 금병산(272 m), 백월산(482 m), 정병산(567 m) 등이 위치하고 있으나 뚜렷한 산계를 이루지 못하고 부분적으로 솟구쳐 있는 형상이고, 주변에 걸쳐 수계가 풍

Table 1. Results of drilling test (modified from Changwon City, 2003).

Borehole No.	Sand layer (m)	Silty sand layer (m)	Sandy gravel layer (m)	Weathered zone (m)
IP1	-	12.0	-	4.3
IP2	14.0	14.4	16.3	0.8
IP3	12.0	16.6	15.7	0.7
IP4	14.0	12.7	16.8	0.7
IP5	20.0	7.5	16.5	0.6
CH4	17.0	10.0	16.0	-
IP6	20.5	10.0	15.0	1.0
BH5	25.0	-	17.0	-
IP7	15.5	11.3	10.3	-
Average	17.3	11.8	15.5	1.4

부한 편으로 북쪽으로 낙동강이 인접해 있고 서쪽으로는 주남저수지 및 동판저수지 등이 위치하고 있으며 비교적 넓은 충적 평야를 형성하고 있어 농경지로 이용된다(Changwon City, 2004).

연구지역의 지질은 중생대 백악기 상부 경상누층군의 유천층군과 이를 관입한 불국사관입암류와 그리고 이들을 부정합으로 피복하고 있는 제4기의 충적층으로 구성되어 있다. 유천층군은 화산암류와 퇴적암류로 분류되며, 화산암류들은 안산암질응회암, 유문암질응회암, 그리고 역질응회암 등으로 구성되어 있다. 연구지역은 안산암질응회암으로 나타나고 있다. 퇴적암류는 석회암, 녹색셰일, 처트질 셰일 및 장석질 사암 등으로 구성되어 있다. 불국사관입암류는 화강섬록암과 규장암으로 나타나고, 화강섬록암은 퇴적암층과 화산암류를 관입하여 있는 형태로, 규장암은 산성암맥의 형태로 나타나고 있다. 제4기의 충적층은 사행하고 있는 낙동강 본류와 지류변에 주로 분포하고 있으며, 범람원 기원의 하성층으로 대부분 모래, 자갈, 실트의 호층으로 구성되어 있다. 충적층은 상당한 폭과 두께를 갖고 있으며, 대부분 경작지로 이용되고 있다(Hamm et al., 2002; Cheong et al., 2003).

Changwon City (2003)에 의하면 연구지역내 9개의 시추공을 대상으로 지질조사를 한 결과, 모래층(평균 두께 17.3 m), 실트질 모래층(평균 두께 11.8 m), 모래자갈층(평균 두께 15.5 m), 풍화대(평균 두께 1.4 m)의 층후를 나타내고 있다(Fig. 2와 Table 1). 주 대수층은 모래자갈층이며, 이 층을 통하여 주로 지하수 유동이나 하천수 유입이 예상된다. 충적층을 좀 더 세분화하면, 지표로부터 차례로 세립질 모래층, 중립질 모래층, 세립질 모

Fig. 2. Location map of study area.

래층, 모래자갈층과 안산암질응회암의 풍화대로 구분된다(Cheong et al., 2003).

연구방법

본 연구에 이용된 대수층의 시료는 창원시 강변여과수 개발사업(2단계)에서 방사형집수정 수평집수관의 시공 시 채취된 모래자갈층의 시료이다. 수평집수관의 시공은 배토가압식 공법(Ranney Method)으로 시행되었다. 배토가압식 공법은 비트의 회전이나 타격에 의한 굴진이 아닌 압입에 의해 수평집수관의 시공이 이루어지기 때문에 교란되지 않은 원지반의 시료 채취가 가능하다는 장점이 있어 대수층의 정확한 지질특성을 파악할 수 있다. 대수층의 시료는 현장에서 입도분석시험(KS F 2502) 규격에 따라 실시하였으며, 40여개에 대한 수평집수관의 1.5 m 구간별 시료를 모두 분석하였다. 연구에 이용된 분석 결과는 대수층의 수평적 특성을 반영하기 위해 수평집수관의 처음, 중간, 끝부분의 시료를 선정하여 총 120개의 시료 결과를 대상으로 하였다.

연구지역 대수층의 토양특성 분석을 위해 입도분석 결과로부터 유효입경(effective size, d_{10}), 균등계수(coefficient of uniformity, C_u), 곡률계수(coefficient of curvature, C_c)를 산출하였다. 또한 입도분석 결과를 이용하여 여러 경험식에 의한 연구지역 대수층의 수리전도도를 산정하였다. 현장에서 측정된 수평집수관의 유량 자료를 이용하여 수평집수관에서 스크린 내 지하수의 유입속도를 산정하였다. 대수층의 특성을 나타내는 수리전도도와 스크린 내 지하수의 유입속도 및 유량과의 상관성은 회귀분석(regression analysis)을 통해 선형 회귀선 모델을 제시하였다. 마지막으로 선형 회귀선에 의한 추정치와 실측 자료를 비교함으로써 제시한 선형 회귀선 모델의 신뢰성을 검증하였다.

Fig. 3. Sample collected for applying the Ranney Method.

Fig. 4. Results of the grain size analysis for radial collector wells ((a) No. 1, (b) No. 2, (c) No. 3, (d) No. 4, and (e) No. 5).

결과 및 토의

입도분석에 의한 토양특성

입도분석은 고결되지 않은 퇴적입자의 크기를 분석하는 것으로, 입자의 크기에 따라 토양의 특성을 파악할 수 있다. 본 연구에 이용된 대수층의 시료는 배토기압식 공법으로 시공 시 채취된 모래자갈층의 시료이다(Fig. 3). 채취한 시료샘플의 입도분석은 입자의 직경 0.075 mm (No. 200체)를 기준으로 조립토와 세립토로 구분하고, 본 연구에서는 0.075 mm보다 큰 조립토를 대상으로 체분석을 실시하였다. 입도분석은 골재의 입도분석시험 규격에 따라 실시하였으며, 시험장비는 전동식 입도분석 시험기, 체는 표준망체를 사용하였다. 이와 같은 조건에서 시험을 실시하여 방사형집수정 #1호정에서 #5호정의 수평집수관에 대한 스크린의 구간별 입도분석결과를 모두 획득하였다.

Fig. 4는 방사형집수정의 수평집수관에서 채취한 시료에 대해 대표적인 입도분포곡선을 나타내었다. 점선으로 표시된 입도분포곡선은 양수량이 가장 적은 수평집수관을, 실선은 양수량이 가장 많은 수평집수관을 각각 나타내고 있다. 방사형집수정의 양수량은 #4호정이 가장 적고, #5호정이 가장 많은 것으로 측정되었다. 각각의 수평집수관에서 단위길이당 최소, 최대양수량은 #1호정에서는 32.0 m³/day (#1-9)에서 87.4 m³/day (#1-N1), #2호정에서는 24.3 m³/day (#2-12)에서 67.7 m³/day (#2-N1), #3호정에서는 39.6 m³/day (#3-4)에서 62.2 m³/day (#3-6), #4호정에서는 5.8 m³/day (#4-9)에서 28.3 m³/day (#4-6), #5호정에서는 63.3 m³/day (#5-8)에서 134.0 m³/day (#5-N1)의 수치를 나타내고 있다. 입도분포곡선에서 방사형집수정 #3호정의 시료를 제외하면 대체로 완만한 기울기를 보이며, 대수층의 입경은 세립질 모래에서 중립질 자갈이 혼합되어 있음을 알 수 있다. 또한 유효입경의 범위는 0.26~0.76 mm이고, 평균은 0.38 mm로 나타나고 있어 중립질 모래로 분류된다(Sterrett, 2007).

입도분포곡선을 이용하여 대수층 시료에 대한 균등계수와 곡률계수를 산출하였다. 일반적으로 균등계수가 모래에서는 6이상, 자갈에서는 4이상이고, 곡률계수가 1~3의 범위를 나타내면 입도분포가 양호한 토양이라고 정의할 수 있다. Fig. 5는 균등계수와 곡률계수를 이용하여 도시화하였다. 균등계수의 범위는 1.8~14.9이고, 곡률계수의 범위는 0.2~1.3으로 나타나고 있다. 상기의 조건에 비교해보면 #5-8-26 시료만 입도분포가 양호한

Fig. 5. Characteristics of the grain size distribution.

것으로 나타났고, 나머지 수평집수관에서 채취한 시료는 입도분포가 불량인 것으로 분석되었다.

경험식에 의한 수리전도도 산정

일정한 동수구배 하에서 지하수가 대수층을 통해 유동하는 능력을 투수성이라 하며, 대수층의 투수성을 결정짓는 수리특성인자로는 수리전도도 등이 있다(Hahn, 2000). 대수층의 수리전도도는 현장 대수성시험이나 실내시험을 통해 수치를 얻는 것이 일반적이거나, 공극율 및 입경 사이의 경험식을 바탕으로 수치를 구할 수 있다.

Vukovic and Soro (1992)에 의하면 수리전도도 산정의 여러 경험식은 다음과 같이 일반화하여 표현할 수 있다(Odong, 2013).

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

여기서, K 는 수리전도도(LT⁻¹), g 는 중력가속도(LT⁻²), ν 는 20기준 동점성계수(L²T⁻¹), C 는 분급계수(무차원), $f(n)$ 은 공극율함수(무차원), d_e 는 유효입경(L)이다.

동점성계수는 점성계수와 유체의 밀도로 표현된다.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2)$$

여기서, ν 는 동점성계수(L²T⁻¹), μ 는 점성계수(ML⁻¹T⁻¹), ρ 는 유체의 밀도(ML⁻³)이다.

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

$$n = 0.255(1 + 0.83^U) \quad (3)$$

$$U = \left(\frac{d_{60}}{d_{10}} \right) \quad (4)$$

여기서, n 은 공극율(무차원), U 는 균등계수(무차원), d_{60} 은 입도분포곡선에서 60%에 해당되는 입자의 크기(L), d_{10} 은 입도분포곡선에서 10%에 해당되는 입자의 크기(L)이고 유효입경이라고 한다.

일반화된 식 (1)에서 분급계수항과 공극율함수항을 여러 경험식에 적용하면 다음과 같다.

Hazen식은 균등계수가 5보다 작고, 유효입경이 0.1 mm에서 3 mm인 세립질 모래에서 세립질 자갈까지 적용된다(Kasenow, 2002; Odong, 2013).

$$K = \frac{g}{\nu} \cdot 6.0 \times 10^{-4} \cdot [1 + 10(n - 0.26)] \cdot d_{10}^2 \quad (5)$$

Kozeny-Carman식은 Kozeny가 경험식을 제안하고, 후에 Carman이 수정하여 만든 경험식이다. 주로 중립질 토양에 적용되고, 유효입경이 3 mm 이상 또는 점토질 토양에는 적합하지 않는 것으로 알려져 있다(Carrier, 2003).

$$K = \frac{g}{\nu} \cdot 8.3 \times 10^{-3} \cdot \left[\frac{n^3}{(1-n)^2} \right] \cdot d_{10}^2 \quad (6)$$

Beyer식은 공극율함수항을 1로 가정하고, 균등계수를 이용하여 식을 표현한다. 불균질한 분포와 불량 분급을 가진 토양에서도 적용이 가능하다. 적용범위는 균등계수가 1에서 20 사이에, 유효입경은 0.06 mm에서 0.6 mm 이다(Kasenow, 2002; Odong, 2013).

$$K = \frac{g}{\nu} \cdot 6.0 \times 10^{-4} \cdot \log \frac{500}{U} \cdot d_{10}^2 \quad (7)$$

Slichter식은 유효입경이 0.01 mm에서 5 mm인 조건에 적용한다(Kasenow, 2002; Odong, 2013).

$$K = \frac{g}{\nu} \cdot 1.0 \times 10^{-2} \cdot n^{3.287} \cdot d_{10}^2 \quad (8)$$

Terzaghi식은 주로 조립질 모래에 적용되고, 분급계수(C_i)의 범위는 6.1×10^{-3} 에서 10.7×10^{-3} 으로 알려져 있다(Cheng and Chen, 2007). 본 연구에서는 평균인 8.4×10^{-3} 을 적용하였다.

$$K = \frac{g}{\nu} \cdot C_i \cdot \left(\frac{n - 0.13}{\sqrt{1-n}} \right) \cdot d_{10}^2 \quad (9)$$

미국 개척국(U.S. Bureau of Reclamation)에서 제안한 경험식(Vukovic and Soro, 1992)은 다른 경험식과 다르게 d_{20} 을 이용하여 식을 표현하고, 균등계수가 5보

다 작은 중립질 모래에 적용된다(Cheng and Chen, 2007).

$$K = \frac{g}{\nu} \cdot 4.8 \times 10^{-4} \cdot d_{20}^{0.3} \cdot d_{20}^2 \quad (10)$$

수리전도도 산정에 있어 대수층의 시료는 수평집수관의 처음, 중간, 끝부분의 3부분으로 나누어 분석을 하였고, 총 120개의 시료에 대해 적용하였다. Table 2는 입도분석에 의해 여러 가지 경험식을 이용하여 산정된 연구지역의 수리전도도를 정리하였고, 각 수평집수관의 평균 수리전도도를 나타낸다.

상기에 서술한 조건들을 각각의 경험식 조건에 적용하여 비교분석한 결과는 다음과 같다. Hazen식과 USBR식의 조건에서 균등계수가 5보다 큰 수평집수관의 시료는 총 120개의 시료 중에서 57개의 시료가 초과하는 것으로 나타나 입도분포가 불량인 모래자갈층의 수리전도도를 산정하기에는 적합하지 않는 것으로 나타났다. Kozeny-Carman식, Slichter식과 Terzaghi식은 모래자갈층의 입경을 나타내기에 부적합하였다. Beyer식에서 균등계수는 3개의 시료에서, 유효입경은 1개의 시료가 초과하는 것으로 분석되었지만 다른 경험식에 비해 적용할 수 있는 균등계수의 범위가 넓어 연구지역의 대수층과 같이 입도분포가 불량인 모래자갈층의 수리전도도를 산정하기에 가장 적합한 것으로 나타났다.

대수층의 구성 물질을 나타내는 유효입경과 경험식을 이용해 산정된 수리전도도의 상관관계를 분석하였다(Fig. 6). 상관분석 결과, 유효입경과의 상관계수는 Hazen식에서는 0.778, Kozeny-Carman식에서는 0.451, Beyer식에서는 0.927, Slichter식에서는 0.548, Terzaghi식에서는 0.510이고, USBR식에서는 0.738로 나타났다. 유효입경과의 관계에서 Beyer식에 의한 수리전도도의 상관성이 가장 높고, Kozeny-Carman식, Slichter식과 Terzaghi식은 상관성이 낮은 것으로 분석되었다. 앞서 경험식에서 제시한 조건과 유효입경과의 상관분석을 통해 연구지역에서 경험식을 통한 수리전도도 산정에 있어 Beyer식이 가장 적합한 것으로 나타났다.

Cheong et al. (2008)에 의하면 본 연구지역의 인근에 위치한 대산면 갈전리 강변여과수 취수지역에서 입도분석, 양수시험 및 순간충격시험으로부터 각 지층의 평균 수리전도도를 구한 결과, 주 대수층인 모래자갈층의 수리전도도는 2.49×10^{-1} cm/s이며, 상, 하부 세립질 모래층의 수리전도도는 각각 1.38×10^{-2} cm/s, 2.18×10^{-2} cm/s 그리고 중립질 모래층의 수리전도도는 $4.89 \times$

Table 2. Values of hydraulic conductivity calculated from grain size analysis using various empirical formulas.

Lateral No.		Hazen (cm/s)	Kozeny-Carman (cm/s)	Beyer (cm/s)	Slichter (cm/s)	Terzaghi (cm/s)	USBR (cm/s)
#1	#1-3	0.136	0.141	0.126	0.047	0.081	0.065
	#1-5	-	0.062	0.140	0.026	0.041	-
	#1-N1	0.167	0.128	0.152	0.045	0.077	0.077
	#1-N2	0.130	0.148	0.117	0.047	0.083	0.051
	#1-7	0.151	0.119	0.132	0.041	0.071	0.063
	#1-9	0.100	0.080	0.121	0.029	0.049	0.031
	Average	0.137	0.113	0.131	0.039	0.067	0.057
#2	#2-2	0.132	0.124	0.125	0.042	0.073	0.056
	#2-4	0.109	0.090	0.109	0.032	0.056	0.044
	#2-6	0.095	0.069	0.104	0.026	0.044	0.039
	#2-8	0.134	0.090	0.130	0.032	0.055	0.069
	#2-10	-	0.077	0.200	0.033	0.052	-
	#2-12	0.134	0.097	0.110	0.034	0.059	0.062
	#2-N1	0.108	0.092	0.102	0.032	0.056	0.045
	#2-N2	0.119	0.103	0.116	0.036	0.063	0.054
	Average	0.119	0.093	0.125	0.033	0.057	0.053
#3	#3-2	0.208	0.105	0.141	0.036	0.060	0.082
	#3-4	0.283	0.166	0.201	0.056	0.094	0.090
	#3-6	0.336	0.313	0.242	0.098	0.172	0.143
	#3-8	0.358	0.227	0.260	0.076	0.130	0.113
	#3-10	0.186	0.092	0.175	0.036	0.060	0.090
	#3-12	0.215	0.200	0.198	0.065	0.113	0.075
	Average	0.264	0.184	0.203	0.061	0.105	0.099
#4	#4-1	0.133	0.121	0.128	0.042	0.073	0.067
	#4-2	0.088	0.045	0.083	0.018	0.028	0.042
	#4-4	-	0.047	0.121	0.020	0.031	-
	#4-5	0.099	0.089	0.099	0.030	0.052	0.032
	#4-6	-	0.047	0.119	0.020	0.031	-
	#4-7	-	0.064	0.156	0.027	0.043	-
	#4-8	0.139	0.092	0.140	0.035	0.059	0.074
	#4-9	-	0.082	0.125	0.031	0.053	-
	#4-11	0.085	0.072	0.097	0.026	0.045	0.040
	#4-12	0.095	0.070	0.128	0.027	0.045	0.036
	Average	0.107	0.073	0.120	0.028	0.046	0.049
#5	#5-2	0.288	0.339	0.259	0.107	0.188	0.101
	#5-6	0.228	0.228	0.213	0.077	0.134	0.098
	#5-8	-	0.175	0.254	0.072	0.118	-
	#5-12	0.267	0.205	0.264	0.075	0.128	0.133
	#5-16	0.232	0.249	0.212	0.081	0.143	0.094
	#5-18	0.261	0.168	0.210	0.061	0.106	0.185
	#5-20	0.173	0.147	0.207	0.055	0.094	0.108
	#5-22	0.207	0.226	0.188	0.073	0.129	0.078
	#5-N1	0.212	0.216	0.198	0.072	0.126	0.091
	#5-N2	0.199	0.159	0.172	0.055	0.094	0.088
	Average	0.230	0.211	0.218	0.073	0.126	0.108
Total average		0.176	0.134	0.159	0.047	0.080	0.076

Fig. 6. Results of the correlation analysis of hydraulic conductivity versus effective size, calculated using the following empirical formulas ((a) Hazen equation, (b) Kozeny-Carman equation, (c) Beyer equation, (d) Slichter equation, (e) Terzaghi equation, and (f) USBR equation).

10^{-2} cm/s를 제시하였다. 이러한 연구결과는 본 연구지역에서 경험식에 의해 추정된 수리전도도의 범위와 유사하게 나타나고 있다. 평균 수리전도도는 Hazen식에 의해 산정된 0.176 cm/s의 수치가 가장 높게 나타났고, Slichter식에서 산정된 0.047 cm/s의 수치가 가장 낮은 것으로 분석되었다. 연구지역에서 가장 적합한 경험식인 Beyer식에 의해 산정된 수리전도도의 결과는 0.083 ~ 0.264 cm/s의 범위, 평균 0.159 cm/s이다. 이는 모래층과 자갈층의 범위에 속하고(Fetter, 2001), 투수성이 양호하다는 것을 의미한다. 또한 방사형집수정 수평집수관의 양수량 자료와 비교하면 양수량이 가장 많은 #5호정의 평균 수리전도도가 가장 높고, 가장 적은 #4호정의 평

균 수리전도도가 가장 낮게 나타났다.

Fig. 7은 각각의 경험식에 의해 산정된 수리전도도의 수치를 상자수염그림(box-whisker plot)을 이용하여 나타내었다. 상자수염그림은 최소값, 1사분위수, 2사분위수(중위수), 3사분위수, 최대값을 이용하여 표현된다. 분석 결과, Hazen식에 의해 산정된 수리전도도의 중위수가 가장 크고, Slichter식에 의해 산정된 수치가 가장 낮게 나타났다. 앞서 평균 수리전도도 결과와 비교하면 같은 결과를 나타낸다.

Table 3은 각각의 경험식에 의해 산정된 수리전도도의 수치를 상관행렬(correlation matrix)을 이용하여 나타내고 있다. Kozeny-Carman식, Slichter식과 Terzaghi식

Table 3. Correlation matrix of the empirical formula variables.

Variable	Hazen	Kozeny-Carman	Beyer	Slichter	Terzaghi	USBR
Hazen	1.000					
Kozeny-Carman	0.847	1.000				
Beyer	0.933	0.869	1.000			
Slichter	0.868	0.995	0.907	1.000		
Terzaghi	0.855	0.996	0.895	0.999	1.000	
USBR	0.839	0.671	0.835	0.721	0.710	1.000

Fig. 7. Results of hydraulic conductivity calculated from empirical formulas using box-whisker plot.

의 결과에서 상관계수가 0.995에서 0.999로 높은 상관 관계를 나타내고 있고, Hazen식과 Beyer식에 의한 상관 계수는 0.933으로 나타났다. USBR식에서는 다른 경험 식에 비해 0.671에서 0.839의 상관계수를 나타내고 있어 상대적으로 낮은 상관관계를 나타내는 것으로 분석되었다.

단위길이당 스크린 내 지하수의 유입속도

스크린을 통한 취수량은 식 (11)과 같이 정의되고 (Delleur, 2007), 수평집수관의 유량과 스크린의 제원에 의해 단위길이당 스크린 내 지하수의 유입속도를 산정할 수 있다.

$$Q = V_e A_o \quad (11)$$

여기서, Q = 유량(L^3T^{-1}), V_e = 스크린 내 지하수의 유입 속도(LT^{-1}), A_o = 유효 개공면적(L^2)이다.

Delleur (2007)에 의하면 유효 개공면적은 자갈입자에

의해 약 50%의 개공면적이 막히는 것으로 가정하고 있고, 유효 개공면적은 식 (12)와 같이 표현된다.

$$A_o = \left[2 \times 3.14 \times \left(\frac{D}{2} \right) \times L \right] \times O_a \times 50\% \quad (12)$$

여기서, A_o = 유효 개공면적(L^2), D = 스크린 직경(L), L = 스크린 길이(L), O_a = 스크린 개공율(%)이다.

Wrap-wire 스크린의 개공율은 16 ~ 52 % 범위로 제작이 가능하며, 개공율은 식 (13)으로 계산이 가능하다 (Sterrett, 2007).

$$O_a = \left(\frac{S}{S+W} \right) \times 100(\%) \quad (13)$$

여기서, O_a = 스크린 개공율(%), S = 슬롯 사이즈(L), W = 와이어 폭(L)이다.

Table 4는 방사형집수정의 수평집수관에서 단위길이당(1 m) 스크린 내 지하수의 유입속도를 산정하였다. 양수량이 가장 많은 #5호정의 평균 유량과 지하수의 유입 속도는 각각 84.1 m^3/day , 1.240 cm/s 로 나타났고, 가장 적은 #4호정에서는 15.6 m^3/day , 0.230 cm/s 로 분석되었다. Wendling et al. (1997)에 의하면 현장에서 수집된 자료들을 분석한 결과, 관정에서 지하수의 흐름이 층류로 유지되는 스크린 내 지하수의 유입속도는 3 ~ 6 cm/s 정도이고, 본 연구지역의 자료와 비교하면 수평집수관에 서 지하수의 흐름은 층류의 형태로 이동한다.

스크린 내 지하수 유입속도와 수리전도도 관계

대수층의 특성을 나타내는데 있어 대표적 수리상수인 수리전도도는 지하수의 유동과 밀접한 관계가 있다. Fig. 8은 여러 경험식에 의해 산정된 수리전도도와 스크린 내 지하수 유입속도와의 관계를 회귀분석을 실시하여 도시화하였다. 회귀분석은 독립변수와 종속변수 사이의 관계를 분석하기 위하여 사용되는 방법으로서, 회귀선의 기울기와 절편으로 선형 회귀선을 나타내고, 상관계수

Table 4. Entrance velocity into the screen per unit length.

Lateral No.		Diameter (mm)	Screen length (m)	Slot size (mm)	Screen open area (%)	Effective open area (m ²)	Flow rate (m ³ /day)	Entrance velocity (cm/s)
#1	#1-3	200	48.0	1.0	25	0.079	34.9	0.514
	#1-5	200	49.5	1.0	25	0.079	42.3	0.624
	#1-N1	200	49.5	1.0	25	0.079	87.4	1.289
	#1-N2	200	49.5	1.0	25	0.079	87.4	1.289
	#1-7	200	48.0	1.0	25	0.079	34.9	0.514
	#1-9	200	48.0	1.0	25	0.079	32.0	0.472
#2	#2-2	200	34.5	1.0	25	0.079	32.4	0.477
	#2-4	200	24.0	1.0	25	0.079	46.5	0.686
	#2-6	200	48.0	1.0	25	0.079	46.5	0.686
	#2-8	200	48.0	1.0	25	0.079	43.6	0.643
	#2-10	200	24.0	1.0	25	0.079	40.7	0.600
	#2-12	200	34.5	1.0	25	0.079	24.3	0.358
	#2-N1	200	49.5	1.0	25	0.079	67.7	0.998
	#2-N2	200	49.5	1.0	25	0.079	64.8	0.956
#3	#3-2	200	22.5	1.0	25	0.079	42.2	0.622
	#3-4	200	24.0	1.0	25	0.079	39.6	0.583
	#3-6	200	24.0	1.0	25	0.079	62.2	0.917
	#3-8	200	24.0	1.0	25	0.079	62.2	0.917
	#3-10	200	24.0	1.0	25	0.079	39.6	0.583
	#3-12	200	24.0	1.0	25	0.079	39.6	0.583
#4	#4-1	200	24.0	1.0	25	0.079	11.6	0.171
	#4-2	200	43.5	1.0	25	0.079	22.5	0.331
	#4-4	200	24.0	1.0	25	0.079	17.4	0.257
	#4-5	200	49.5	1.0	25	0.079	16.4	0.242
	#4-6	200	69.0	1.0	25	0.079	28.3	0.418
	#4-7	200	24.0	1.0	25	0.079	11.6	0.171
	#4-8	200	40.5	1.0	25	0.079	24.1	0.356
	#4-9	200	24.0	1.0	25	0.079	5.8	0.086
	#4-11	200	27.0	1.0	25	0.079	10.3	0.152
	#4-12	200	18.0	1.0	25	0.079	7.8	0.114
#5	#5-2	200	22.5	1.0	25	0.079	74.4	1.097
	#5-6	200	37.5	1.0	25	0.079	78.2	1.152
	#5-8	200	37.5	1.0	25	0.079	63.3	0.933
	#5-12	200	21.0	1.0	25	0.079	79.8	1.176
	#5-16	200	24.0	1.0	25	0.079	69.8	1.029
	#5-18	200	24.0	1.0	25	0.079	93.0	1.372
	#5-20	200	24.0	1.0	25	0.079	93.0	1.372
	#5-22	200	24.0	1.0	25	0.079	69.8	1.029
	#5-N1	200	37.5	1.0	25	0.079	134.0	1.975
	#5-N2	200	37.5	1.0	25	0.079	85.6	1.262

Fig. 8. Results of the linear regression analysis of entrance velocity into the screen versus hydraulic conductivity, calculated using the following empirical formulas ((a) Hazen equation, (b) Kozeny-Carman equation, (c) Beyer equation, (d) Slichter equation, (e) Terzaghi equation, and (f) USBR equation).

(correlation coefficient, R)와 결정 계수(coefficient of determination, R^2)는 변수들 사이의 상관관계를 나타낸다. 회귀분석은 경험식을 이용하기에 조건이 맞지 않는 자료와 현장에서 측정된 자료 중 편차가 크거나 동일한 수치를 나타내는 자료를 제외하고 실시하였다. 방사형집수정 구조상 방사형으로 수평집수관이 설치되기 때문에 하천 방향으로 설치된 수평집수관은 최대 수치를 나타내고, 인근에 위치한 수평집수관에서는 동일한 수치를 나타내는 경우도 있다. Fig. 8에서 “*”로 표시된 부분은 회귀분석에서 제외시킨 자료들을 나타내고 있다.

회귀분석 결과, Beyer식을 이용한 결과가 상관관계가 가장 높게 나타났고, Kozeny-Carman식에 의한 결과가

상관관계가 가장 낮게 나타났다(Fig. 8). 앞서 유효입경과 각각의 경험식을 이용해 산정된 수리전도도의 상관관계에서도 Beyer식에 의한 수리전도도의 상관성이 가장 높고, Kozeny-Carman식에 의한 수리전도도의 상관성이 가장 낮게 나타났는데 이는 연구지역 대수층의 수리전도도를 나타내기 위해 Beyer식에 의한 결과가 우수하다는 것을 나타낸다. Beyer식을 이용하여 만든 선형 회귀식은 수리전도도와 스크린 내 지하수 유입속도와의 상관관계를 약 72%로 나타내어 선형 회귀식에 의한 추정치가 높은 신뢰성을 가질 수 있다. 또한 대수층의 평균 수리전도도와 평균 지하수의 유입속도는 각각 0.155 cm/s, 0.620 cm/s로 나타나고 있어 수리전도도에 비해

Fig. 9. Results of the linear regression analysis of flow rate versus hydraulic conductivity, calculated using the following empirical formulas ((a) Hazen equation, (b) Kozeny-Carman equation, (c) Beyer equation, (d) Slichter equation, (e) Terzaghi equation, and (f) USBR equation).

지하수의 유입속도가 약 4배 정도 빠른 것으로 분석되었다.

유량과 수리전도도 관계

여러 경험식에 의해 산정된 수리전도도와 유량과의 관계를 분석하였다. 회귀분석은 앞서 스크린 내 지하수의 유입속도 분석과 동일하게 경험식을 이용하기에 조건이 맞지 않는 자료와 현장에서 측정된 자료 중 편차가 크거나 동일한 수치를 나타내는 자료를 제외하고 실시하였다. Fig. 9에서 “*”로 표시된 부분은 회귀분석에서 제외시킨 자료들을 나타내고 있다.

회귀분석 결과, Beyer식을 이용한 결과에서 상관관계

가 가장 높게 나타났고, Kozeny-Carman식에 의한 결과에서 상관관계가 가장 낮게 나타나고 있는데(Fig. 9), 이는 유효입경과 각각의 경험식을 이용해 산정된 수리전도도의 상관관계와 같은 결과를 나타내고 있다. Beyer식을 이용한 수리전도도와 유량과의 선형 회귀식의 적합성은 약 72%로 나타나고 있어 수리전도도에 의한 유량의 추정치가 높은 신뢰성을 가지는 것으로 분석되었다. 스크린 내 지하수 유입속도와 유량과의 관계를 검토한 결과, 두 변수들 간에 양의 상관관계가 높게 나타났고, 수리전도도와 스크린 내 지하수 유입속도 및 유량과의 회귀분석에서도 같은 결과를 도출하였다.

Fig. 10. Comparison of the linear regression analysis of estimated versus actual data ((a) entrance velocity into the screen, and (b) flow rate).

자료의 검증

앞서 서술한 바와 같이 Beyer식을 이용하여 산정된 수리전도도의 수치가 연구지역에서 가장 적합한 것으로 나타났고, 수리전도도와 스크린 내 지하수 유입속도, 수리전도도와 유량과의 관계를 식 (14)와 (15)로 나타낼 수 있었다. 분석에 이용된 자료의 범위를 검토한 결과, Beyer식에 의한 수리전도도는 0.083 ~ 0.264 cm/s, 수평 집수관에서 단위길이당(1 m) 스크린 내 지하수의 유입 속도는 0.152 ~ 1.372 cm/s이고, 산출되는 유량의 범위는 10.3 ~ 93.0 m³/day이다.

$$\text{Entrance velocity into the screen} = 5.423 \times \text{Hydraulic conductivity} - 0.220 \quad (14)$$

$$\text{Flow rate} = 367.9 \times \text{Hydraulic conductivity} - 14.990 \quad (15)$$

Fig. 10은 상기의 식을 검증하기 위해 현장에서 얻어진 실측자료와 식 (14)와 (15)를 이용하여 추정된 결과를 도시화하였다. 스크린 내 지하수의 유입속도 자료는 0.152 ~ 1.372 cm/s의 범위이고, 추정된 결과는 0.230 ~ 1.212 cm/s이다. 유량 자료의 범위는 10.3 ~ 93.0 m³/day이고, 추정된 결과의 범위는 15.5 ~ 82.1 m³/day이다. 회귀분석 결과, 지하수 유입속도와 유량의 추정치가 약 72 % 일치하는 것으로 나타났다.

국내에서는 처음으로 수리전도도와 스크린 내 지하수 유입속도와의 관계, 수리전도도와 유량과의 관계를 선형 회귀식으로 설명함으로써 변수들 간의 관계에 대해 수치적으로 정량화 시킬 수 있었다. 이러한 관계식은 본 연구지역의 실측자료를 바탕으로 제시를 하였고, 연구지역과 유사한 대수층에서 적용이 가능할 것이라고 판단된다. 하지만 지하수 유동에는 여러 가지 인자들(대수층

의 특성, 지하수위, 방사형집수정의 제원 등)의 영향을 받으므로 향후 이러한 특성들에 대한 추가적인 분석이 필요하다. 여러 지역의 대수층에서 현장의 실측자료가 추가로 분석되어 반영된다면 이러한 관계식은 더욱 정밀성을 나타내게 될 것이다.

결론

본 연구에서는 창원시 강변여과수 개발사업(2단계)에서 채취한 미고결 퇴적물의 시료를 이용하여 경험식에 의해 수리전도도를 산정하고자 하였고, 또한 산정된 대수층의 수리전도도와 방사형집수정의 수평집수관에서 산출되는 유량과의 상관관계를 규명하고자 하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

입도분포곡선 분석 결과, 수평집수관에서 채취한 대수층의 구성 물질은 모래와 자갈이 혼합되어 있어 입도 분포가 불량한 퇴적층으로 분류되고, 입경은 세립질 모래에서 중립질 자갈까지의 범위를 나타내고 있다.

여러 경험식을 이용하여 수리전도도를 산정한 결과, 평균 수리전도도는 Hazen식에 의해 산정된 0.176 cm/s의 수치가 가장 높고, Slichter식에서 산정된 0.047 cm/s 수치가 가장 낮은 것으로 나타났다. 연구지역의 대수층에서는 Beyer식에 의한 수리전도도가 가장 적합한 것으로 판정되었다. 산정된 수리전도도는 0.083 ~ 0.264 cm/s의 범위, 평균 0.159 cm/s로 나타내고 있어 연구지역의 대수층 특성은 투수성이 양호한 것으로 나타났다. 또한 방사형집수정 수평집수관의 양수량 자료와 비교하면 평균 수리전도도와의 관계는 양의 상관관계가 나타났다.

방사형집수정의 수평집수관에서 단위길이당(1 m) 스크린 내 지하수의 유입속도를 산정한 결과, 양수량이 가장 많은 #5호정의 평균 유량과 지하수의 유입속도는 각

각 $84.1 \text{ m}^3/\text{day}$, 1.240 cm/s 로 나타났고, 가장 적은 #4 호정에서는 $15.6 \text{ m}^3/\text{day}$, 0.230 cm/s 로 분석되었다. 또한 수평집수관에서 스크린 내 지하수의 흐름은 층류의 형태로 이동한다.

산정된 수리전도도와 스크린 내 지하수 유입속도 및 유량과의 회귀분석 결과, Beyer식을 이용한 결과가 상관관계가 가장 높게 나타났고, Kozeny-Carman식에 의한 결과가 상관관계가 가장 낮게 나타났다. Beyer식을 이용하여 만든 선형 회귀식은 수리전도도와 스크린 내 지하수 유입속도 및 유량과의 상관관계가 약 72%로 나타나고 있어 선형 회귀식에 의한 추정치가 높은 신뢰성을 가지는 것으로 분석되었다. 현장에서 얻어진 실측자료와 수리전도도를 이용하여 추정한 결과는 지하수 유입속도와 유량에서 추정치가 약 72% 일치하는 것으로 나타났다.

본 연구결과는 연구지역과 유사한 대수층에서 적용이 가능할 것이라고 사료되며, 향후 여러 지역의 대수층에서 현장의 실측자료가 추가로 분석되어 반영된다면 이러한 선형 회귀식은 더욱 정밀성을 나타내게 될 것이다.

사 사

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업인 수변지하수 활용고도화연구단 3세부과제(과제번호-11기술혁신 CO5-3)의 연구비 지원을 받아 수행 되었습니다. 또한 본 논문 심사 시 부족한 부분을 지적하여 주신 익명의 심사 위원분들께 감사를 드립니다.

References

- Carrier, W. D., 2003, Goodbye, Hazen; Hello, Kozeny-Carman, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1054-1056.
- Changwon City, 2003, The Report of Development Feasibility and Pilot-Plant Study of Riverbank Filtration by Radial Collector Well, IV-14p (in Korean).
- Changwon City, 2004, The Report of Detailed Design for Development Project of Riverbank Filtration (Second Phase) in Changwon City, IX-4p (in Korean).
- Changwon City, 2014, The Data of Waterworks Office in Changwon City, <http://sudo.changwon.go.kr/> (in Korean).
- 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.
- Cheong, J. Y., Hamm, S. Y., Kim, H. S., Son, K. T., Cha, Y. H., Jang, S., and Baek, K. H., 2003, Characteristics of Waterlevel Fluctuation in Riverside Alluvium of Daesan-myeon, Changwon City, *The Journal of Engineering Geology*, 13, 4, 457-474 (in Korean with English abstract).
- Cheong, J. Y., Hamm, S. Y., Kim, H. S., Ko, E. J., Yang, K. H., and Lee, J. H., 2008, Estimating hydraulic conductivity using grain-size analyses, aquifer tests, and numerical modeling in a riverside alluvial system in South Korea, *Hydrogeology Journal*, 16, 6, 1129-1143.
- Chung, J. H., Park, J. H., Park, C. K., Yang, J. S., Kim, D. K., Jeong, K. C., Choi, Y. S., and Bu, S. A., 2004, Calculation of the Yield of Bank Filtration by Using the Horizontal Collector Wells, *The Journal of Engineering Geology*, 14, 4, 417-427 (in Korean with English abstract).
- Delleur, J. W., 2007, *The Handbook of Groundwater Engineering*, CRC Press, 2nd ed., 1320p.
- Fetter, C. W., 2001, *Applied Hydrogeology*, Prentice-Hall, Inc., 4th ed., 598p.
- Hahn, J. S., 2000, *Groundwater Environment and Pollution*, Parkyoung Publishing Co., 1071p (in Korean).
- Hamm, S. Y., Cheong, J. Y., Ryu, S. M., Kim, M. J., and Kim, H. S., 2002, Hydrogeological Characteristics of Bank Storage Area in Daesan-Myeon, Changwon City, Korea, *Journal of Geological Society of Korea*, 38, 4, 595-610 (in Korean with English abstract).
- Hamm, S. Y., Cheong, J. Y., Kim, H. S., Hahn, J. S., and Ryu, S. H., 2004, A Study on Groundwater Flow Modeling in the Fluvial Aquifer Adjacent to the Nakdong River, Book-Myeon Area, Changwon City, *Economic and Environmental Geology*, 37, 5, 499-508 (in Korean with English abstract).
- Hamm, S. Y., Cheong, J. Y., Kim, H. S., Hahn, J. S., and Cha, Y. H., 2005, Groundwater Flow Modeling in a Riverbank Filtration Area, Daesan-Myeon, Changwon City, *Economic and Environmental Geology*, 38, 1, 67-78 (in Korean with English abstract).
- Hyun, S. G., Woo, N. C., Shin, W. S., and Hamm, S. Y., 2006, Characteristics of Groundwater Quality in a Riverbank Filtration Area, *Economic and Environmental Geology*, 39, 2, 151-162 (in Korean with English abstract).
- Kasenow, M., 2002, *Determination of Hydraulic Conductivity from Grain Size Analysis*, Water Resources Publications, LLC, 97p.
- Lee, D. K., Park, J. H., Park, C. K., Yang, J. S., Nam, D. H., Kim, D. K., Jeong, G. C., Choi, Y. S., and Boo, S. A., 2004, Application of the Artificial Recharge to Reduce the Ground-water Drawdown of the Riverbank Filtration, *The Journal of Engineering Geology*, 14, 4, 391-400 (in Korean with English abstract).
- Lee, E. H., Hyun, Y. J., Lee, K. K., Kim, H. S., and Jeong, J. H., 2010, Evaluation of Well Production by a Riverbank Filtration Facility with Radial Collector Well System in Jeungsan-ri, Changnyeong-gun, Korea, *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 15, 4, 1-12 (in Korean with English abstract).
- Odong, J., 2013, Evaluation of Empirical Formulae for Determination of Hydraulic Conductivity based on Grain-Size Analysis, *International Journal of Agr. & Env.*, 4, 1, 1-8.

- Sterrett, R. J., 2007, Groundwater and Wells, Johnson Screens, a Weatherford Company, 3rd ed., 812p.
 Vukovic, M. and Soro, A., 1992, Determination of Hydraulic Conductivity of Porous Media from Grain-Size Composition, Water Resources Publications, 83p.
 Wendling, G., Chapuis, R. P., and Gill, D. E., 1997, Quantifying the effects of well development in unconsolidated material, Ground Water, 35, 3, 387-393.

김태형

팬아시아워터 수자원연구부
 305-330, 대전광역시 유성구 은구비로 8 보광빌딩 302호
 Tel: 070-4269-0665
 Fax: 042-671-5518
 E-mail: thkim9795@gmail.com

정재훈

팬아시아워터 수자원연구부
 305-330, 대전광역시 유성구 은구비로 8 보광빌딩 302호
 Tel: 070-7773-8721
 Fax: 042-671-5518
 E-mail: jaehoon76@gmail.com

김 민

팬아시아워터 수자원연구부
 305-330, 대전광역시 유성구 은구비로 8 보광빌딩 302호
 Tel: 070-7773-8720
 Fax: 042-671-5518
 E-mail: mzone77@naver.com

오세형

팬아시아워터 수자원연구부
 305-330, 대전광역시 유성구 은구비로 8 보광빌딩 302호
 Tel: 070-7773-8723
 Fax: 042-671-5518
 E-mail: purity5302@hanmail.net

이재성

팬아시아워터 수자원연구부
 305-330, 대전광역시 유성구 은구비로 8 보광빌딩 302호
 Tel: 070-7773-8722
 Fax: 042-671-5518
 E-mail: leejaesung82@gmail.com