

## 지질 및 지하수 모델링을 활용한 낙동강 델타지역의 해안 피압대수층 특성화

이성호<sup>1</sup> · 박대희<sup>1</sup> · 이영동<sup>1</sup> · 원경식<sup>1,\*</sup> · 김중휘<sup>2</sup>

<sup>1</sup>지오텍컨설팅(주)

<sup>2</sup>중원대학교 자원순환환경공학과

### 요 약

부산시 삼락구 낙동강 델타지역 해안 피압대수층 대상으로 담수 주입을 통한 염수오염 방지 및 지하수자원 확보를 위해 실증 프로젝트가 진행 중이다. 대수층의 불균질성에 의한 수리지질학적 이방성은 지하수 유동 및 염분 이동에 크게 영향을 미친다. 따라서 성공적인 실증실험을 위해서 해당 해안 피압대수층의 수리지질적 특성화는 중요하다. 본 연구는 삼차원 지질 모델링을 이용하여 해안 피압대수층을 대상으로 피압대수층에 분포하는 수리적으로 불균질한 매질을 정량적으로 특성화하고 사실적으로 가시화 하고자 하였고, 정상류 지하수 유동 모델링을 수행하여 불균질성의 영향을 평가하였다. 지질 모델링은 시추 코어 자료를 전산화하여 층서 모델링, 격자 모델링, 지층 모델링, 베리오그램 분석, 카테고리 모델링을 순차적으로 수행하였다. 카테고리 모델링은 분석을 통해 선정된 베리오그램을 바탕으로 순차 지시 시뮬레이션을 이용하여 100회 수행되었다. 그 결과들은 입력 자료인 층적층 매질 비율에 크게 영향을 받음을 보여준다. 따라서 원시 자료의 대수층 매질 비율과 유사하게 실효 매질 모래와 모래가 카테고리 모델링 결과에서도 피압대수층 전체에 걸쳐 우세하게 나타난다. 지하수 모델링 결과들은 카테고리 모델링 결과로 얻어진 불균질한 매질을 그대로 반영함을 보여준다. 그 결과, 수리수두 그리고 유동속도 크기는 부분적으로는 자갈과 풍화암에 영향을 받지만 우세한 매질인 실효 매질 모래와 모래에 크게 영향을 받음을 보여준다.

**주요어:** 낙동강 삼각주, 해안 피압대수층, 불균질성 특성화, 지질 모델링, 지하수 모델링

**Sungho Lee, Daehye Park, Young Dong Lee, Kyoung-Sik Won and Jung-Hwi Kihm, 2016, Heterogeneity characterization in a coastal confined aquifer of the Nakdong River delta area using geological and groundwater modeling. Journal of the Geological Society of Korea. v. 52, no. 4, p. 511-523**

**ABSTRACT:** A field validation project for reducing seawater contamination and securing fresh groundwater resources via fresh water injection is carried out in a coastal confined aquifer of Nakdong River delta, Busan. Hydrogeological anisotropy due to aquifer heterogeneity significantly affects groundwater flow and salt transport. In order to make the project succeed, hydrogeological characterization for the confined aquifer is very important. In this study, geologic modeling is performed using a geologic model to quantitatively characterize and realistically visualize the distributions of aquifer media, after then steady state groundwater modeling based on the results from the geologic modeling is carried out to evaluate an impact of media heterogeneity on groundwater flow. First, the geologic modeling is sequentially performed through digitization of raw core data, stratigraphic modeling, grid modeling, geologic formation modeling, variogram analysis, and category modeling. The category modeling is performed 100 times using sequential indicator simulation with the selected variograms in the variogram analysis. The results of the simulations show that the proportion of the material categories results in volume fraction of the confined aquifer. In other words, the confined aquifer has as much abundance of silty sand and sand as raw data. The results of groundwater modeling directly show the impacts of aquifer heterogeneity. As a result, hydraulic head and Darcian mass flux magnitudes are not only partially affected by gravels and weathered rocks but also dominantly affected by silty sands and sands.

**Key words:** Nakdong River delta, coastal confined aquifer, heterogeneity characterization, geologic modeling, groundwater modeling

\* Corresponding author: +82-31-436-0830, E-mail: [geoinfo@geoinfo.co.kr](mailto:geoinfo@geoinfo.co.kr)

(Sungho Lee, Daehee Park, Young Dong Lee and Kyoung-Sik Won, Geotech Consultant Co. Ltd., Gunpo 15850, Republic of Korea; Jung-Hwi Kihm, Department of Resources Recycling and Environmental Engineering, Jungwon UniverSilty, Goesan-Gun 28024, Republic of Korea)

## 1. 서론

최근 기후변화 및 수질오염에 따른 국제적인 물 부족 현상은 과학적, 환경적, 사회적 및 경제적 측면에서 매우 중요한 문제로 떠오르고 있다(Kim and Kim, 2010). 특히 안정적인 수자원의 수량 및 안전한 수질을 지속적으로 확보하기 위해서는 어느 한 가지 수자원에 의존할 수 없으며, 수자원의 다변화가 필요하다. 따라서 다양한 수자원을 확보하기 위한 연구들이 국내·외에서 활발히 진행되고 있으며 이 중 안정적 지하수 자원에 대한 관심이 집중되고 있다(Kim and Kim, 2010). 이러한 지하수 자원을 안정적으로 보존하고 확보하는 방안의 하나로 지하수 함양에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다(Seo *et al.*, 2010; Kim *et al.*, 2014; Park *et al.*, 2014). 지하수 함양에는 함양 방법에 따라 자연적 함양, 식물 관리를 통한 함양 증대, 강변여과(river filtration)에 의한 유도 함양, 도시화 및 관개시설 관련 누수에 따른 부수적 함양, 그리고 인공함양(artificial recharge) 등이 있다(Tyler *et al.*, 1996; Bouwer, 2000, 2002; Querner, 2000; Lerner, 2002). 이 중 인공함양은 현재의 지하수 부족량을 증대시키거나 미래의 수량을 확보하는데 있으며, 그 외에도 인공함양을 통하여 해수 침투 및 지반 침하를 감소시키는 공학적 문제해결이나, 토양과 대수층을 활용한 수질개선 노력 등에도 그 목적을 두고 있다(Bouwer, 2002; Escalante and Senent, 2010). 더불어 지하수 대수층을 통한 수자원의 지하저장은 지표 댐의 활용에 비해 수문학적, 경제적, 위생적, 생태학적, 환경적, 사회문화적 관점에서 다양한 장점을 가지고 있기 때문에, 수자원의 단기적 혹은 장기적인 확보를 위해 인공함양의 이용이 점차 증가되고 있는 추세이다(Abiko and Katsuragi, 1994; Zhang and Yan, 1994; Oh *et al.*, 2011; Moon *et al.*, 2014).

국외의 인공함양 적용사례 및 연구사례를 보면, 미국 캘리포니아와 플로리다 해안지역에서 다수의 주입점에 담수를 주입하는 인공함양을 통해 해수의 침투 예방과 지하수 자원을 확보하는 적용사례가 보

고되었다(Alyssa *et al.*, 2008; Shin and Byun, 2010). Izbicki *et al.* (2010)은 미국 캘리포니아에서 담수를 사용하여 대수층 저장 및 회수(aquifer storage and recovery, ASR) 실험을 수행하였고 수치 모델링을 통하여 담수 이동에 대한 지질 매체의 이방성의 영향을 연구하였다. Phien-wej *et al.* (1998)은 태국 방콕에서 지하수의 과잉 취수로 인해 발생한 지하수 고갈과 지반 침하를 개선하기 위해 대수층에 담수를 주입한 후 지하수량 증가와 지반 회복을 관측하였다. Bouri and Dhia (2010)는 튀니지에서 30년간 농업용 관개 수로를 통해 주기적인 담수 주입을 실시한 후 압력 수두와 염분 농도 측정을 통하여 담수 주입으로 인한 해수 침투 저감 효과를 확인하였다. Masciopinto (2006)는 담수/해수의 경계면 모델을 통해 이탈리아 남부 해안 지역에 존재하는 싱크홀(sinkhole)을 대상으로 주입했을 때의 담수와 해수간의 경계면의 이동을 분석하였다.

국내에서 인공함양의 사례는 제주도 한천지역의 사례(Oh *et al.*, 2011; Seo *et al.*, 2014), 지하수위 회복을 위한 암반대수층에 소규모 인공함양(Lee *et al.*, 2014; Park *et al.*, 2015), 낙동강변 충적층에 수자원확보를 위한 소규모 인공함양(Won *et al.*, 2013; Moon *et al.*, 2014), 그리고 강변여과수 취수에 의한 과도한 지하수위 하강을 방지하기 위한 인공함양(Lee *et al.*, 2004) 등의 사례가 있다. 더불어 인공함양의 효율성 파악은 수치 모델링을 통한 연구(Park *et al.*, 2008, Cho and Kim, 2009, Lee and Kim, 2015), 현장 조사 및 실험(Won *et al.*, 2015) 등이 수행되었다. 그 중 Park *et al.* (2008)은 수리동력학적 분산 모델을 이용하여 지하수 유동 및 염수 이동에 대한 지층 내 단층존재의 영향을 평가하였다. 또한 지층 내 불균질성과 수리전도도 분포의 이방성은 지하수 소용돌이(groundwater whirls)를 야기한다(Hemker and Bakker, 2006). 결과적으로 대수층 내 단열대의 존재 또는 지층 내 불균질성은 수리지질학적 이방성을 야기해 지하수 유동 및 염분 이동에 큰 영향을 미친다. 아울러 Lee and Kim (2015)은 인공함양을 적용하려면 상당히 오랜 시간과 많은 비용이 소요되기 때문에 이러한

기술을 적용하기 이전에 후보 지역에서 인공함양의 적용성 및 효용성에 대한 철저한 사전 타당성 조사가 선행되어야 함을 지적하였다.

본 연구의 목적은 삼차원 지질 모델링을 이용하여 최근에 대용량 청정지하수 확보를 위해 담수주입이 계획된 낙동강 수변지역 해안 피압대수층을 대상으로 피압대수층에 분포하는 불균질한 매질을 정량적으로 특성화하고 사실적으로 가시화하는 것이다. 더불어 본 연구는 지하수 모델링을 이용하여 지질 모델링을 통해 특성화되고 가시화된 해안 피압대수층을 대상으로 정상류 지하수 유동 모델링을 수행하여 불균질성의 영향을 평가하고자 한다. 이를 달성하기 위하여 먼저 연구 지역 내 시추공 코어 자료와 같은 원시 자료를 수집하여 분석하고 전산화하였으며, 이를 사용하여 지질 모델링을 위한 기본적인 전산 입력 자료를 생성하였다. 그리고 이러한 전산 입력 자료를 사용하여 층서 모델링, 격자 모델링, 지층 모델링, 카테고리 모델링을 순차적으로 수행하였고, 카테고리 모델링의 결과는 지하수 모델링의 입력 자

료로서 사용하였으며, 정상류 지하수 유동 모델링을 수행하였다.

## 2. 연구 지역 개요

연구 지역은 부산광역시 사상구 삼락수변공원(Samnak Riverside Park) 내에 위치하고 있으며, 낙동강의 퇴적 작용에 의해 형성된 삼각주(delta) 지역이다(그림 1). 연구 지역의 서쪽에는 낙동강(Nakdong River)이 북쪽에서 남쪽으로 흐르고 있다. 연구 지역과 그 주변 지역 지질은 하부로부터 백악기 퇴적암과 이를 분출 또는 관입한 백악기 화산암류(안산암질 화산각력암) 및 심성암류(흑운모 화강암)로 이루어져 있으며, 이를 제4기 충적층이 피복하고 있다(Lee and Kim, 1964) (그림 1). 이러한 제4기 충적층은 해수면의 변동에 의해 플라이스토세 말기부터 시작되어 현재와 같이 두꺼운 퇴적층을 형성하고 있는 것으로 보고되고 있다(Yoo *et al.*, 2004, 2014a, 2014b; Ryu *et al.*, 2005, 2011).

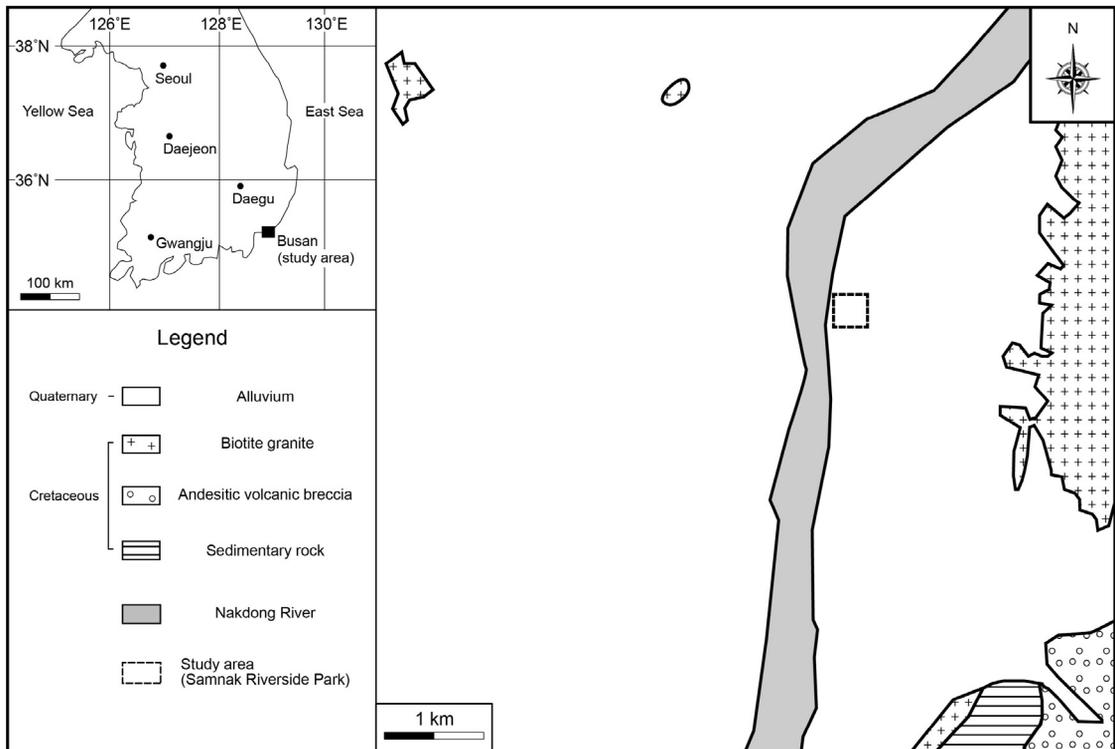


Fig. 1. Location and geologic map of the study area. The geologic map is modified from Lee and Kim (1964).

해안에 위치하는 연구 지역은 총 15개의 시추공이 있으며 이러한 시추공 중 13개의 주상도 정보에 따르면 최하부에는 화강암이 기반암으로 분포하며, 상부로 가면서 풍화암, 자갈, 모래, 실트질 모래로 구성된 하부 대수층(lower aquifer), 점토로 구성된 반(준)대수층(aquitard), 모래로 구성된 상부 대수층(upper aquifer)이 분포한다. 하부 대수층은 피압대수층으로 화강암인 하부 경계와 점토층인 상부 경계로 구성되며, 상부 대수층은 대기과 접하는 자유면대수층으로 이루어졌다. 하부 대수층의 풍화암층 두께는 평균 1.56 m, 자갈층 두께는 평균 7.3 m이며, 모래층의 두께는 평균 19.1 m 그리고 실트질 모래층 두께는 평균 16.1 m이다. 반대수층인 점토층 두께는 평균 13.9 m이다. 상부 대수층인 모래층 두께는 평균 8.0 m 그리고 매립층 두께는 0.6 m이다(그림 2).

### 3. 지질 및 지하수 모델링 개요

#### 3.1 지질 및 지하수 유동 모델

본 연구에서 삼차원 지질 모델링에 이용된 프로그램은 GOCAD Research Group에서 개발한 SKUA-GOCAD (Subsurface Knowledge Unified Approach and Geological Object Computer Aided Design) (Paradigm, 2014)로서 지질 구조 해석이나 격자 모델 생성 및 물성 분포 시뮬레이션, 그리고 탄성과 탐사자료 해석 등 다양한 기능을 제공하는 삼차원 지질 모델링 소프트웨어이다. 이 소프트웨어는 지질학적 특성화가 필요한 에너지자원 탐사, 지열 에너지 개발, 방사성 폐기물 지층처분, 이산화탄소 지중저장 그리고 지하수 개발 등의 다양한 과업에서 활발히 사용 중이다. 더불어 지하수 유동 해석에 이용된 프로그램은 유한요소법을 사용하는 FEFLOW 6.1 (DHI-WASY, 2012)을 사용하였다.

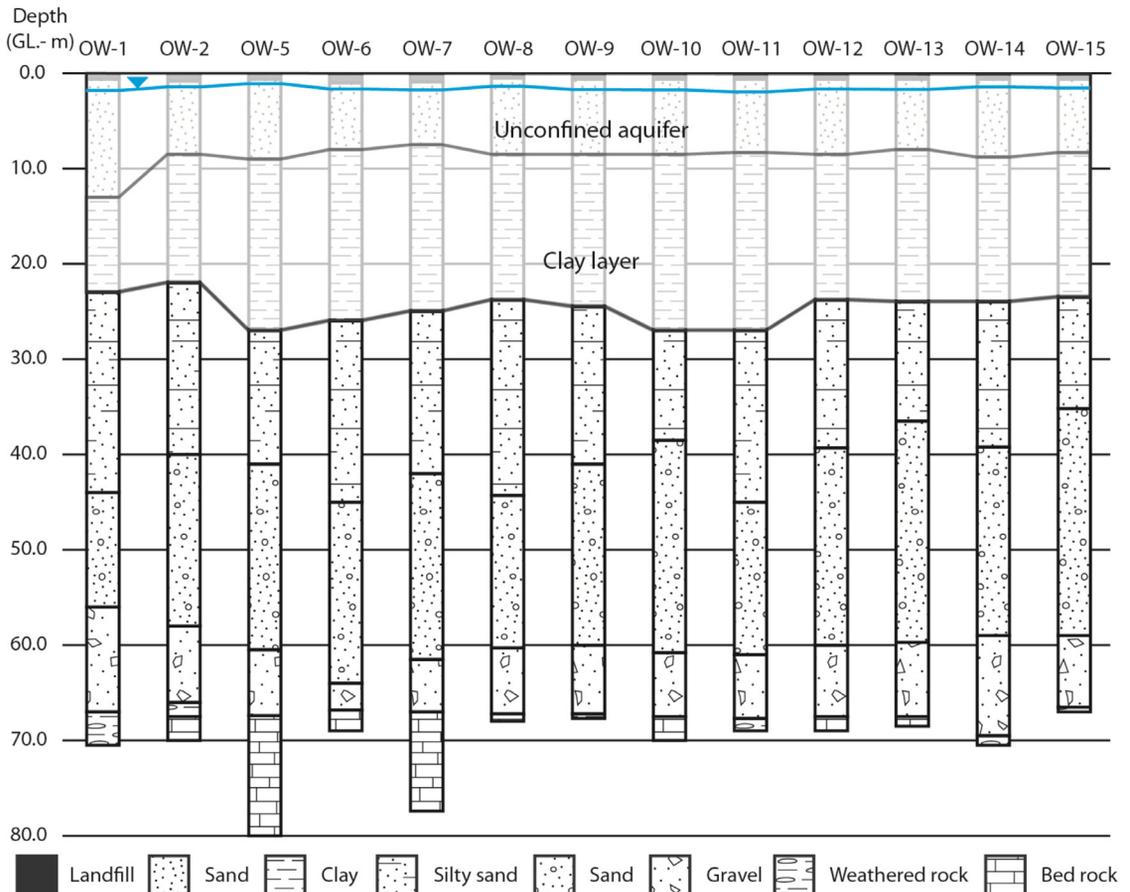


Fig. 2. Geologic logs of the boreholes.

### 3.2 분석 방법

본 연구를 통해서 수행하고자 하는 지질과 지하수 모델링의 개념을 좀 더 명확하게 정립하기 위해서 작업흐름도로 그 방법론을 정의하였다(그림 3). 먼저 연구 지역의 동일한 지질 및 지하수 모델링 영역을 설정한다(그림 3a). 다음으로 시추공 코어 자료와 같은 원시 자료를 수집하여 분석하고 전산화하며(그림 3b), 이를 사용하여 지질 모델링을 위한 기본적인 전산 입력 자료를 생성하고 전산화한다. 그리고 이러한 전산 입력 자료를 사용하여 층서 모델링(3c), 격자 모델링(3d), 지층 모델링(그림 3e), 실험적 및 이론적 베리오그램(variogram) 분석(그림 3f) 및 일종의 암상 모델링(lithofacies modeling)과 동일한 카테고리 모델링(category modeling)(그림 3g)을 순차적으로 수행한다. 다음으로 모든 격자별 카테고리 모델링의 결과에 상응하는 물성(수리전도도)을 지하수 유동 모델링에 입력 자료(격자 중앙)로서 사용한다(그림 3h). 다음으로 입력된 물성을 각 유한요소 절점에 내삽(그림 3i)하고 지하수 유동 시뮬레이션을 수행한다(그림 3j).

### 3.3 지질 및 지하수 모델링 영역

본 연구에서는 신뢰도 높은 지질과 지하수 모델

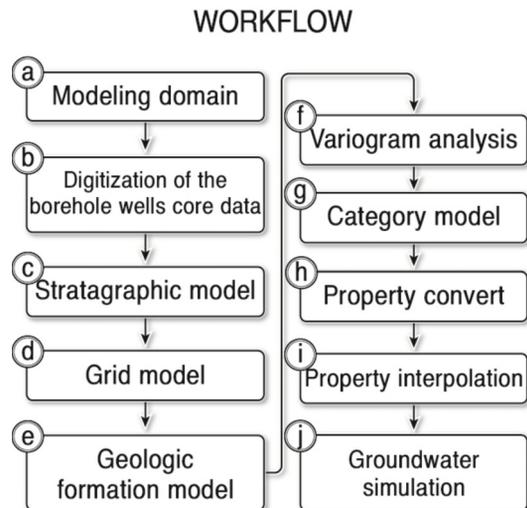


Fig. 3. Workflow of the geologic and groundwater modeling of the study area through (a) modeling domain, (b) digitization of the core data of boreholes, (c) stratigraphic model, (d) grid model, (e) geologic formation model, (f) variogram analysis, (g) category model, (h) property convert, (i) property interpolation and (j) groundwater simulation.

링을 수행하기 위하여 15개 시추공이 포함되도록 연구 지역의 수평 영역(그림 1)과 동일한 동서 350 m, 남북 300 m 설정하였고 수직영역은 해수면 기준 심도 20 ~ 70 m로 본 연구 지역의 관심 지층인 피압대수층(하부 대수층)만 포함하도록 지질 및 지하수 모델링 영역(geologic and groundwater modeling domain)을 설정하였다(그림 4). 그리고 이후 모델링 영역은 카테고리 모델링을 위해 동서 방향(x 방향)으로 5 m 간격으로 70개, 남북 방향(y 방향)으로 5 m 간격으로 60개, 수직 방향(z 방향)으로 1 m 간격으로 50개로 구성하여 총 210,000개의 격자로 이산화되었다. 반면 지하수 모델링을 위한 수평 방향의 간격은 카테고리 모델링 격자망 보다 넓은 동서 방향(x 방향) 10 m 간격으로 35개, 남북 방향(y 방향)은 10 m 간격으로 30개, 수직 방향(z 방향)으로 1 m 간격으로 50개로 구성하여 총 52,500개의 격자로 이산화되었다(그림 4).

### 3.4 원시 자료 분석 및 전산화

먼저 연구 지역에 대한 15개의 시추공 중 피압대수층을 포함하지 않은 2개(OW-3, OW-4) 시추공을 제외하고 13개의 시추공(OW-1 ~ OW-2, OW-5 ~ OW-15)의 코어 자료와 같은 원시 조사 자료를 수집하여 분석하고 전산화하였다. 이러한 13개의 시추공의 하부로부터 기반암, 풍화암, 자갈, 모래, 실트질 모래, 점토가 있다. 이 중 기반암과 점토를 제외한 피압대수층의 투수성 매질에 해당하는 네 개를 취하여 전산화하였다. 이러한 13개의 시추공으로부터 얻어진 피

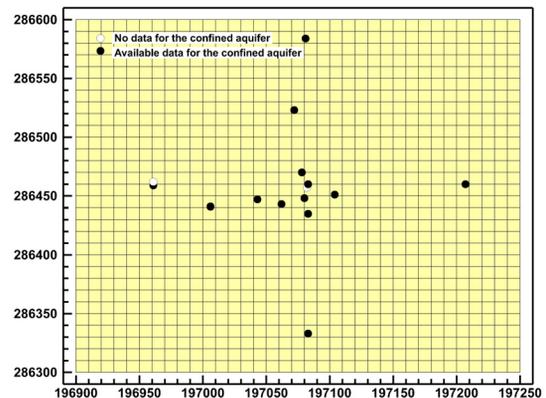


Fig. 4. Modeling domain with the location of boreholes in the study area.

압대수층의 매질 정보 자료에 대해 통계 분석을 수행하였으며, 그 결과는 표 1에 정리되어 있다. 표에서 보다시피 실트질 모래 41.20%, 모래가 42.60%, 자갈이 14.60%, 풍화암이 1.60%로 실트질 모래와 모래가 우세하였다.

### 3.5 지하수 모델링 물성 및 경계 조건 설정

본 연구에서 지하수 모델링은 양수 또는 주입 행위가 이뤄지지 않기 때문에 정상류상태만을 모의하였다. 그렇기 때문에 지하수 지배방정식에서 공간과 시간 영역 중 시간에 대한 변화가 없기 때문에 비저류계수(specific storage)는 모델링 결과에 영향을 미치지 않는다. 따라서 임의 값인  $1 \times 10^{-5}$ 을 모든 격자에 동일하게 입력하였다. 다음으로 수리전도도는 실트질 모래와 모래는 현장 수리시험의 기하평균 값인  $1.47 \times 10^{-5}$  m/sec과  $2.67 \times 10^{-5}$  m/sec을 사용하였고, 현장 수리시험 자료가 없는 자갈과 풍화암은  $1.00 \times 10^{-4}$  m/sec와  $1.00 \times 10^{-6}$  m/sec를 사용하였다(Domenico and Schwartz, 1997; Fetter, 2001). 이러한 수리전도도는 모든 격자별 카테고리 모델링의 결과에 상응하는 물성을 입력 자료(격자 중앙)로서 입력 후 각 절점

에 내삽(inverse distance weighting interpolation)하여 모델링에 이용하였다. 마지막으로 경계 조건은 모델링 영역의 서쪽에는 남북 방향으로 낙동강이 흐르기 때문에 수두변화가 없다고 가정하였다. 따라서 바닥면 심도를 고려한 정수압 조건인 70.0 m의 수리수두를 모델링 서쪽( $x = 196,900$ )에 고정수두 조건을 설정하였다. 다음으로 최외각 시추공 OW-6(동쪽), OW-2(서쪽), OW-7(남쪽), OW-1(북쪽)의 수위자료를 검토해본 결과 OW-6에서는 EL. 0.09 m, OW-2에서는 EL. -0.21 m, OW-7에서는 EL. -0.20 m, OW-1에서는 EL. -0.16 m으로 관측되었다. 또한 연구 지역 동쪽에 높은 지형(백양산, 높이 642.0 m)이 분포함을 고려했을 때 동쪽에서 서쪽으로 흐름이 있을 것으로 판단되어 동쪽과 서쪽의 차이를 0.3 m로 가정하여 70.3 m의 수리수두를 모델링 동쪽( $x = 197,250$ )에 고정수두 조건을 설정하였다.

## 4. 지질 모델링 결과

### 4.1 층서 모델링 결과

상기 작업흐름도에서 언급한바와 같이 원시 조사

**Table 1.** Length and length fraction of aquifer media types of the borehole wells.

Well ID	Silty Sand [m]	Sand [m]	Gravel [m]	Weathered Rock [m]	Total [m]
OW-1	21.0	10.0	4.0	3.5	38.5
OW-2	23.0	13.0	7.0	1.0	44.0
OW-5	14.0	19.5	6.0		39.5
OW-6	15.0	22.0	2.0		39.0
OW-7	18.0	18.5	4.5		41.0
OW-8	21.0	15.0	6.0		42.0
OW-9	20.0	16.0	7.0	1.0	44.0
OW-10	13.0	21.0	6.0	1.0	40.0
OW-11	19.0	15.0	7.0		42.0
OW-12	17.0	19.0	6.0		42.0
OW-13	14.0	22.0	7.0		43.0
OW-14	17.0	18.0	10.0	1.0	46.0
OW-15	12.0	23.0	7.0	1.0	43.0
Sum total [m]	8.5	79.5	232.0	224.0	544.0
Length fraction [%]					
	Silty Sand	Sand	Gravel	Weathered Rock	Sum
	41.20	42.60	14.60	1.60	100.00

자료의 전산화, 층서 모델링, 격자 모델링, 지층 모델링, 베리오그램 분석, 및 카테고리 모델링을 순차적으로 수행하였다. 먼저 입력된 자료(시추공 자료, 모델링 영역 자료)를 이용하여 지질 모델링 영역 전체에서 지층 경계면 분포를 예측하는 층서 모델링을 불연속 평활 보간법(discrete smooth interpolation, DSI method) (Mallet, 1989)을 이용하여 수행하였으며, 그 결과는 그림 5a와 같다. 생성된 층서 모델은 그림과 같이 바닥면과 상부면 순으로 총 2개의 지층 경계면으로 구성되어 있다.

#### 4.2 격자 모델링 결과

상기한 삼차원 층서 모델의 지층 경계면에 기초하여 지층 경계면 사이의 공간을 육면체 격자로 이산화하는 삼차원 격자 모델링을 수행하였으며, 그 결과는 그림 5b와 같다. 그림에서와 같이 생성된 삼차원 격자 모델은 동서 방향으로 70개, 남북 방향으로 60개, 수직 방향으로 50개로 총 210,000개의 동일한 육면체 격자로 이산화되어 있다.

#### 4.3 지층 모델링 결과

상기한 층서 모델 및 격자 모델을 종합하여 지층 분포를 가시화하는 지층 모델링을 수행하였으며, 그 결과는 그림 5c과 같다. 그림에서 보듯이 생성된 지층 모델은 1개의 지층(피압대수층)으로 구성되어 있다.

#### 4.4 카테고리 모델링 결과

카테고리 모델링에서는 대수층매질 정보를 포함한 13개의 시추공(그림 2b, 표 1)이 사용되었다. 그리고 피압대수층은 기반암 및 점토층을 포함하지 않고 있기 때문에 매질 분포 및 체적 비율을 예측하는 삼차원 카테고리 모델링을 수행하지 않았으며, 실트질 모래, 모래, 자갈, 풍화암과 같은 네 가지 종류의 매질에 대해서만 분포 및 체적 비율을 예측하는 삼차원 카테고리 모델링을 수행하였다. 그 결과는 그림 5d와 같다. 13개의 시추공에 존재하는 실트질 모래, 모래, 자갈 및 풍화암 분포 정보 자료에 대해서만 베리오그램 분석 후에 조건부 시뮬레이션을 수행하였다.

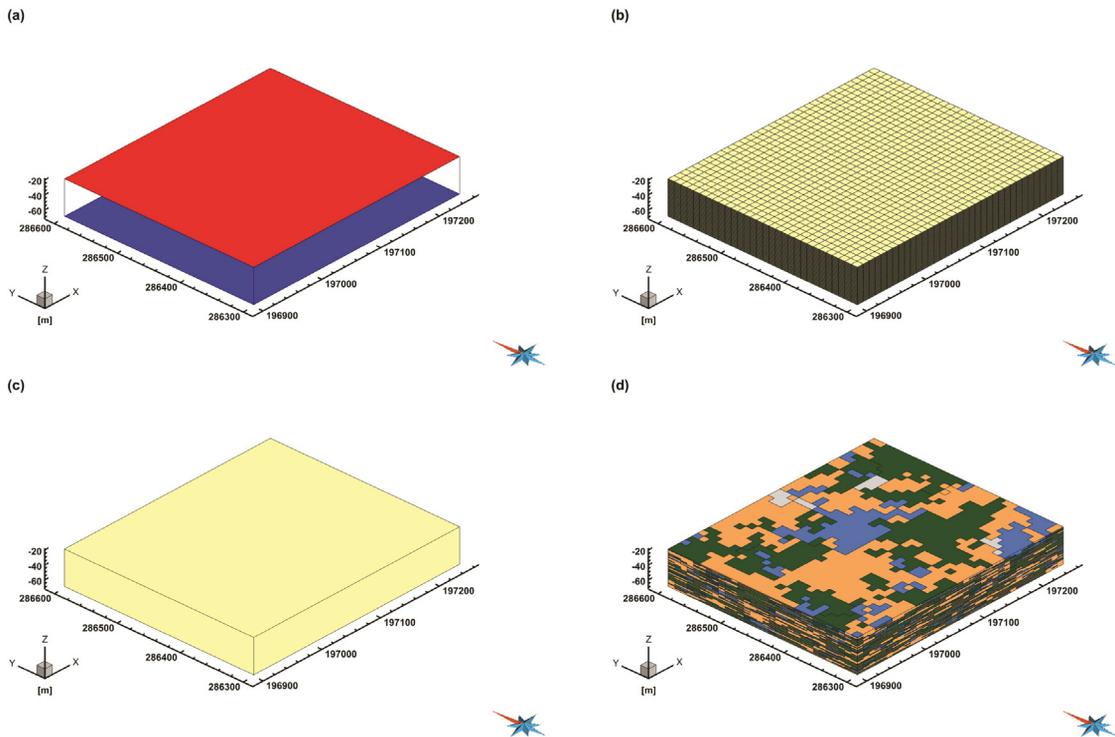


Fig. 5. (a) Stratigraphic model, (b) grid model, (c) geologic formation model and (d) category model of the study area.

#### 4.4.1 베리오그램 분석

13개의 시추공에서 매질의 공간적 상관관계를 파악하기 위해서 베리오그램 분석(Journel and Huijbregts, 1978; Cressie, 1993)을 수행하였다. 먼저 한 기준점을 중심으로 방위(azimuth)는 0°에서 150°까지 30° 간격으로, 경사(dip)는 0°에서 90°까지 10° 간격으로 다양한 경우에 대해서 각각 실험적 베리오그램을 계산하였다. 다음으로 세 가지 이론적 베리오그램 모델인 구형 모델(spherical model), 가우시안 모델(Gaussian model) 및 지수 모델(exponential model) 등을 이용하여 이론적 베리오그램을 계산하였다. 그리고 계산된 이론적 베리오그램들 중 실험적 베리오그램을 가장 잘 대표할 수 있는 최적의 이론적 베리오그램을 세 가지 조건을 기준으로 선정하였다. 이때 이용된 세 가지 조건 중에서 상관 거리(range)는 그 값이 클수록, 회귀 오차제곱합(sum of squares of regression error, SSR)은 추정 값과 자료 평균 값과의 차이의 제곱으로서 그 값이 작을수록, 결정계수(coefficient of determination,  $R^2$ )는 회귀식의 적합도로서 그 값이 1에 가까울수록 최적의 이론적 베리오그램을 의미한다. 따라서 분석 결과, 경사 0°에 특정 방위를 갖지 않는 전방위(omni-direction)의 경향을 나타내고 너깃(nugget)은 0.05, 무턱(sill)은 0.360, 상관 거리는 120.70 m인 구형 모델을 카테고리 모델링에 이용될 최적의 삼차원 이론적 베리오그램으로 선정하였다. 이렇게 선정된 최적의 이론적 베리오그램은 지질 모델링 영역 내에 분포하는 불균질한 피압대수층의 매질 특성을 잘 반영하는 것으로 판단하였다.

#### 4.4.2 조건부 시뮬레이션

상기의 최적의 이론적 베리오그램을 사용하여 불균질한 피압대수층 내 실트질 모래, 모래, 자갈 및 풍화암의 분포 및 체적 비율을 예측하기 위하여 조건부 시물

레이션 기법의 일종인 순차 지시 시뮬레이션(sequential indicator simulation, SIS) (Alabert, 1987)을 100회 수행하였다. 100회의 시뮬레이션 결과 중 동일 카테고리 고리와 비교했을 때 최대의 체적 비율에 해당하는 결과는 표 2와 그림 6과 같다. 표 2에서와 같이 99번째, 72번째, 29번째, 22번째 결과에서 실트질 모래, 모래, 자갈, 풍화암 순으로 동일 카테고리 결과 내에서 최대 체적 비율을 갖게 된다. 이 결과들은 13개의 시추공 자료 통계 분석 결과(표 2)와 마찬가지로 조건부 시뮬레이션 결과에서도 실트질 모래와 모래가 나머지 자갈과 풍화암에 비해서 우세하게 많이 분포한다. 한편 실트질 모래같은 경우는 시추공 통계 분석 결과와 약간의 차이가 발생한다. 이는 지시 크리깅(indicator kriging)을 위해서는 각 매질의 비율(categorical proportion)이 필요하고 이 비율은 SKUA-GOCAD 내에서 샘플링을 통해서 계산되는데 이 계산 결과가 원시 조사 자료와 약간의 차이가 나기 때문에 판단된다. 다음으로 그림 6은 99번째, 72번째, 29번째, 22번째 결과를 삼차원 모델링 영역에 표시하였다. 그림에서 보듯이 모든 결과에서 실트질 모래와 모래가 우세한 것으로 나타난다. 한편 시추공 자료와 상이하게 모든 결과에서 부분적으로 자갈 그리고 풍화암이 대수층 상부면에서도 관찰된다. 이는 선택한 최적의 베리오그램이 특정 방향으로 이방성을 지니지 않고 전 방위에 걸치기 때문으로 판단된다.

### 5. 지하수 모델링 결과

먼저 지하수 모델링에 앞서 상기 작업흐름도에서 언급한바와 같이 지질 모델링의 매질 분포 결과를 해당 수리전도도로 치환 후 모든 격자별로 수리전도도를 입력 자료(격자 중앙)로서 입력 후 각 절점에 내삽 하였으며, 그 결과는 그림 7과 같다. 그림과 같

**Table 2.** Volume fractions of the confined aquifer media.

Statistical value	Volume fraction [%]				
	Silty Sand	Sand	Gravel	Weathered Rock	Total
99th percentile	41.40	41.20	15.10	2.30	100.00
72th percentile	37.10	43.90	16.50	2.50	100.00
29th percentile	38.50	40.50	18.10	2.90	100.00
22th percentile	39.50	42.30	14.90	3.30	100.00

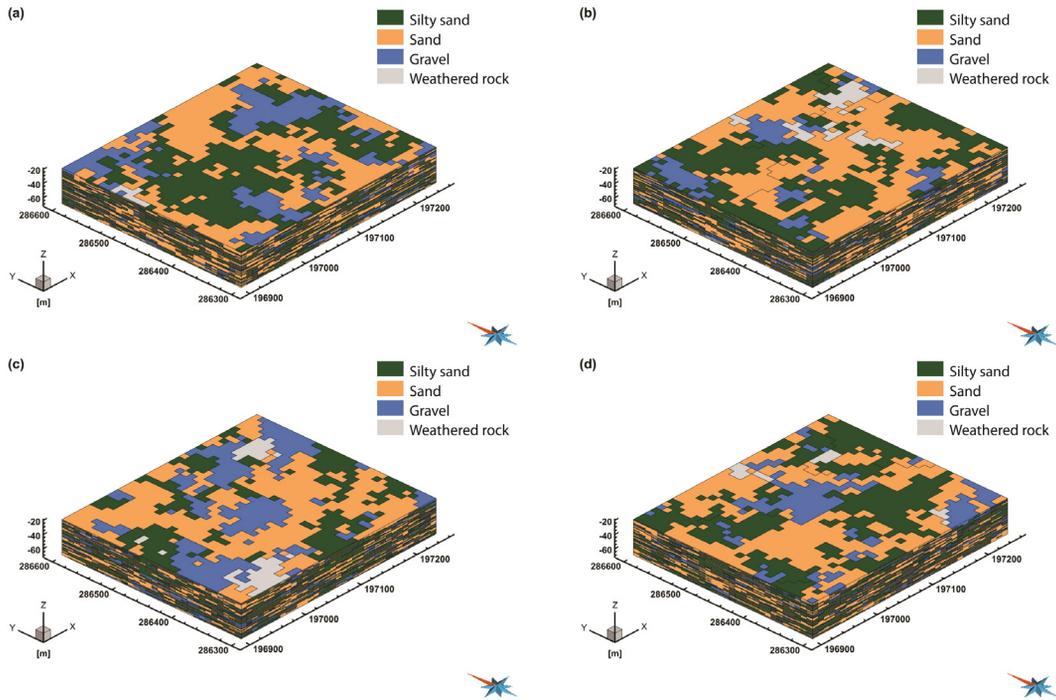


Fig. 6. Category model of (a) 99th realization, (b) 72th realization, (c) 29th realization and (d) 22th realization from sequential indicator simulation.

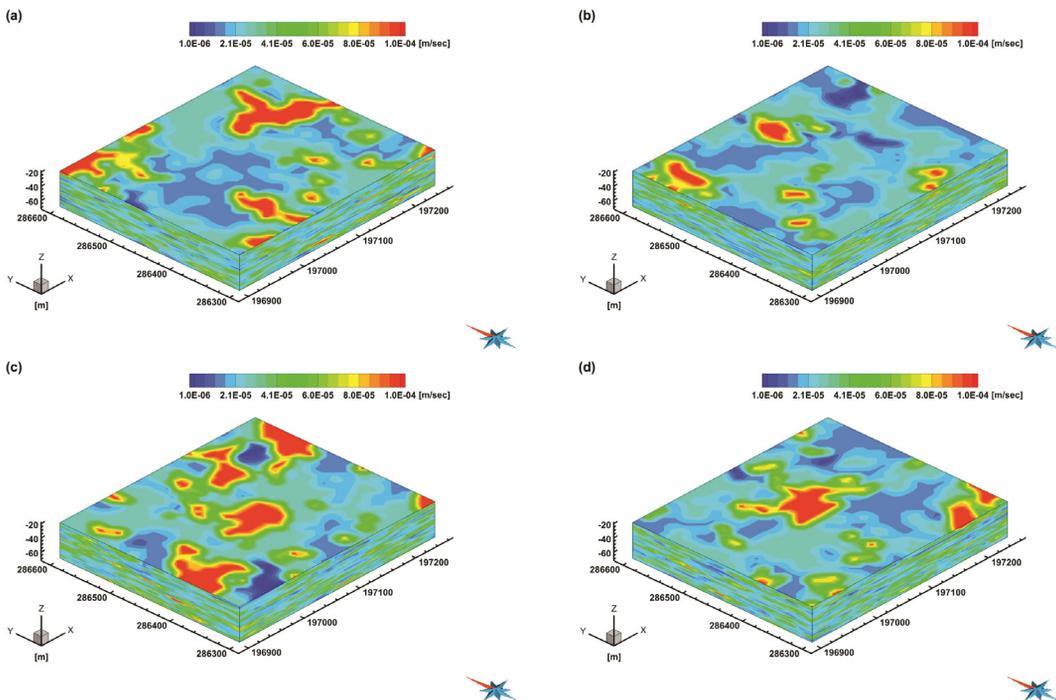


Fig. 7. Spatial distributions of the hydraulic conductivity of (a) 99th realization, (b) 72th realization, (c) 29th realization and (d) 22th realization.

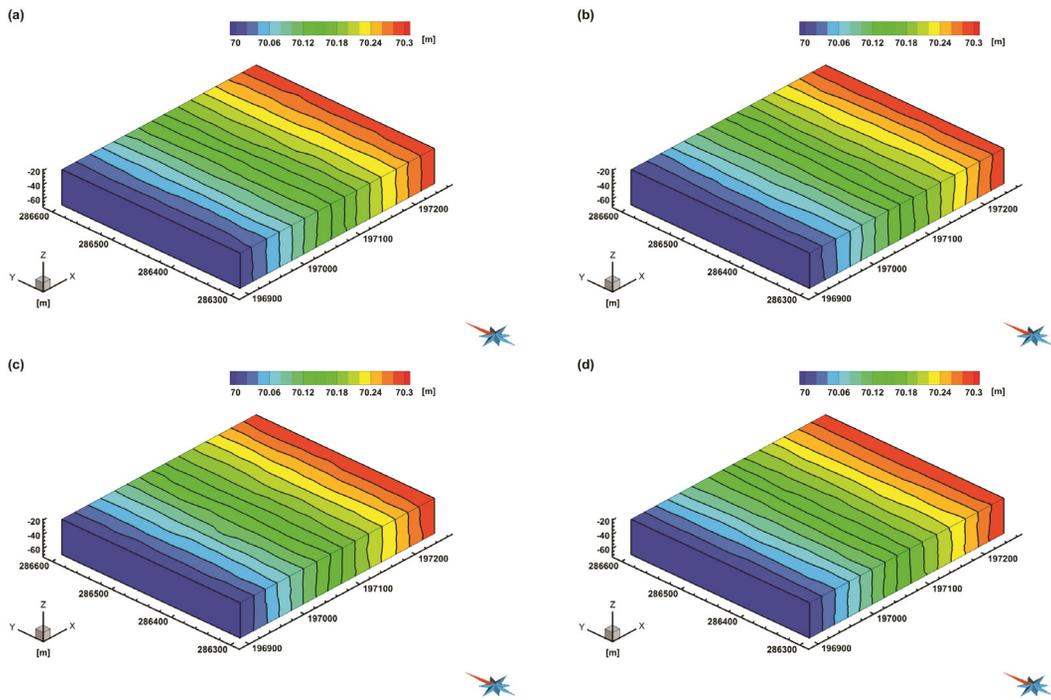


Fig. 8. Spatial distributions of the hydraulic head of (a) 99th realization, (b) 72th realization, (c) 29th realization and (d) 22th realization.

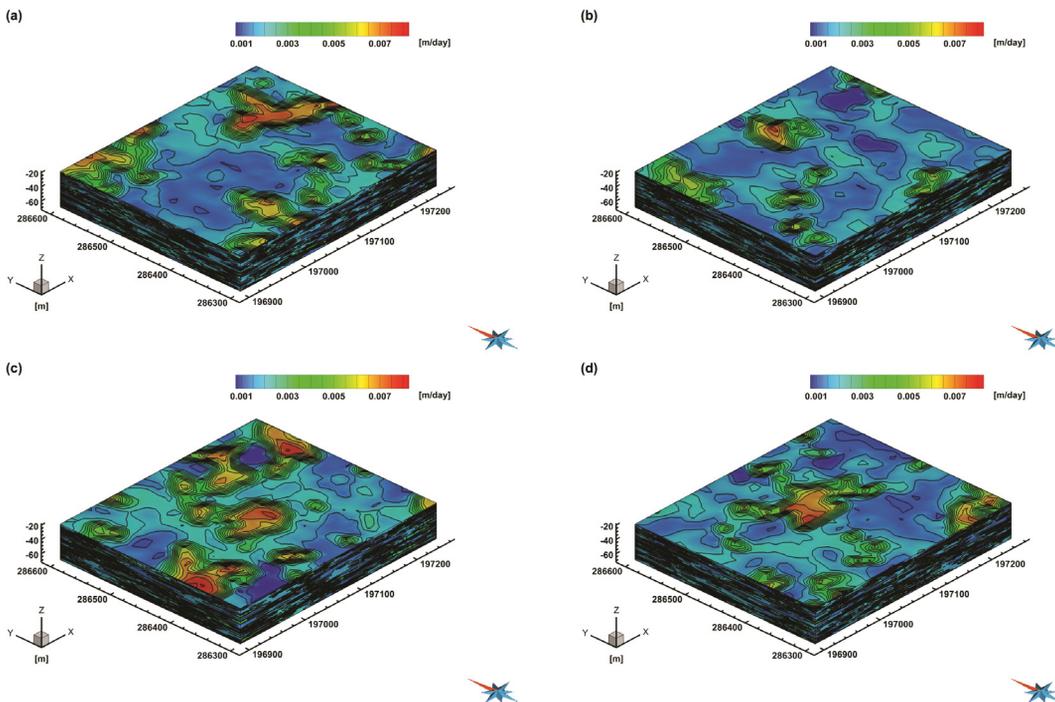


Fig. 9. Spatial distributions of the Darcian mass flux magnitude of (a) 99th realization, (b) 72th realization, (c) 29th realization and (d) 22th realization.

이 자갈이 존재하는 격자를 중심으로 높은 수리전도도 값을 나타내는 반면 풍화암이 존재하는 격자를 중심으로 낮은 수리전도도 값을 나타낸다. 다음으로 이러한 네 개의 불균질한 수리전도도 모델을 바탕으로 일련의 정상류상태 지하수 모델링을 수행하였으며, 그 결과인 수리수두와 유동속도 크기(Darcian mass flux magnitude)를 그림 8과 그림 9에 도시하였다. 그림 8에서 보다시피 동쪽과 서쪽 경계면이 고정 수두이기 때문에 동쪽이 서쪽에 비해 0.3 m 수두가 높고 그 경계면에서는 수위 변화가 없다. 하지만 경계 조건 사이에서 등수위선(equipotential line)은 미세하게 공간적인 변화에 따른 변화를 볼 수 있다. 한편 그림 9의 유동속도 크기는 상대적으로 큰 수리전도도를 가지는 자갈이 분포하는 격자 주변으로 그 크기가 크게 나타나고 상대적으로 작은 수리전도도를 가지는 풍화암이 분포하는 격자 주변으로는 그 크기가 작게 나타난다. 하지만 전반적으로 피압대수층 내 우세한 실트질 모래와 모래에 영향을 받는 것으로 나타난다. 이러한 결과는 지하수 지배방정식이 선형 방정식이기 때문에 불균질한 수리전도도에 따른 영향을 그대로 반영하기 때문으로 판단된다.

## 6. 결 론

인공함양을 통한 청정 지하수 개발 부지인 부산시 삼락구 삼락공원에 존재하는 피압대수층의 불균질한 매질 분포를 정량적으로 특성화하고 이러한 불균질한 매질 내에서 지하수 유동을 정량적으로 분석하기 위해 일련의 지질 모델링과 지하수 모델링을 순차적으로 수행하였다. 상기 모델링을 위하여 먼저 연구 지역 내 시추공 코어 자료와 같은 원시 조사 자료를 수집하여 분석하고 전산화하였으며, 이를 사용하여 지질 모델링을 위한 기본적인 전산 입력 자료를 생성하였다. 그리고 이러한 전산 입력 자료를 사용하여 층서 모델링, 격자 모델링, 지층 모델링, 카테고리 모델링을 순차적으로 수행하였고 카테고리 모델링의 결과는 지하수 모델링의 입력 자료로서 사용하였다. 이러한 입력 자료를 바탕으로 정상류 지하수 모델링을 수행하였다.

지질 모델링 결과들은 입력 자료인 단위매질 비율에 크게 영향을 받음을 보여준다. 먼저 원시 자료의 매질 비율과 유사하게 실트질 모래와 모래가 카

테고리 모델링 결과에서도 피압대수층 전체에 걸쳐 우세하게 나타난다. 한편 시추공 자료에서는 자갈과 풍화암이 하부에만 나타나지만 지질 모델링 결과에는 상부에도 나타난다. 이는 이론적 베리오그램을 바탕으로 하는 카테고리 모델링이 계산적으로는 실제 자료와 통계적으로 유사하게 재현하지만, 최적의 수평적 그리고 수직적 경향을 나타내지 못하였기 때문이다. 따라서 매질에 대해서 카테고리 모델링을 수행 시 상관거리, 회귀오차값 및 결정계수를 고려하여 베리오그램을 선택했다라도 베리오그램 선택 시 주의해야함을 의미한다. 지하수 모델링 결과들은 카테고리 모델링 결과로 얻어진 대수층의 불균질한 매질을 그대로 반영함을 보여준다. 그 결과, 수리수두 그리고 유동속도 크기는 부분적으로는 자갈과 풍화암에 영향을 받지만 우세한 매질인 실트질 모래와 모래에 크게 영향을 받음을 보여준다. 한편 이는 해당 피압대수층 내 실트질 모래와 모래의 수리전도도 크기가 크지 않음을 고려했을 때 해당 지층은 거시적 관점에서는 불균질성에 의한 영향이 아마도 크지 않을 것으로 사료된다. 본 연구에서 수행한 이러한 지질 모델링과 지하수 모델링 결과들은 향후 예상되는 인공함양을 통한 지하수 개발 프로젝트에서 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 사 사

본 연구는 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원에서 위탁시행한 물관리 연구사업에 의한 '수변지하수활용고도화' 연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 아울러 심사 과정에서 발전적인 조언과 비판을 해주신 심사자님들께 깊은 감사를 드립니다.

## REFERENCES

- Abiko, H. and Katsuragi, Y., 1994, Artificial recharge of ground water in case of Yamagata City, Japan. Proceedings of the Second International Symposium on Artificial Recharge of Ground Water, July 17-22, Orlando, Florida, 913.
- Alabert, F., 1987, The practice of fast conditional simulations through the LU decomposition of the covariance matrix. *Mathematical Geology*, 19, 369-386.

- Alyssa, M.D., Christian, L., Michael, C.S. and Virginia, W., 2008, Saltwater/freshwater interface movement in response to deep-well injection in a coastal aquifer. Proceedings of 20th Salt Water Intrusion meeting of the Florida in U.S.A., 50-53.
- Bouri, S. and Dhia, H.B., 2010, A thirty-year artificial recharge experiment in a coastal aquifer in an arid zone: The Teboulba aquifer system (Tunisian Sahel). *Comptes Rendus Geoscience*, 342, 60-74.
- Bouwer, H., 2000, Groundwater problems caused by irrigation with sewage effluent. *Journal Environment Health*, 63, 17-20.
- Bouwer, H., 2002, Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering. *Hydrogeology Journal*, 10, 121-142.
- Cho, H.J. and Kim, J.M., 2009, Three-dimensional numerical simulation of impacts of urbanization on groundwater flow and salt transport in a coastal aquifer, Suyeong-Gu, Busan, Korea. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 14, 1-18 (in Korean with English abstract).
- Cressie, N.A.C., 1993, *Statistics for Spatial Data*, revised edition. John Wiley and Sons, New York, USA, 900 p.
- DHI-WASY, 2012, FEFLOW 6.1 user manual, DHI-WASY. Berlin, Germany, 116 p.
- Domenico, P.A. and Schwartz, F.W., 1997, *Physical and Chemical Hydrogeology 2nd edition*. John Wiley & Sons, New York, 506 p.
- Escalante, E.F. and Senent, M.W., 2010, Implementation of techniques for soil and aquifer treatment (SAT) in Spain. the Proceedings of 7<sup>th</sup> International Symposium of Managed Aquifer Recharge (Electrical version), Paper #0703.
- Fetter, C.W., 2001, *Applied Hydrogeology 4th edition*. Prentice Hall, Inc., New Jersey, 598 p.
- Hemker, K. and Bakker, M., 2006, Analytical solutions for whirling groundwater flow in two-dimensional heterogeneous anisotropic aquifers. *Water Resources Research*, 42, W12419.
- Izbicki, J.A., Petersen, C.E., Glotzbach, K.J., Metzger, L.F., Christensen, A.H., Smith, G.A., O'Leary, D., Fram, M.S., Joseph, T. and Shannon, H., 2010, Aquifer Storage Recovery (ASR) of chlorinated municipal drinking water in a confined aquifer. *Applied Geochemistry*, 25, 1133-1152.
- Journel, A.G. and Huijbregts, Ch.J., 1978, *Mining Geostatistics*. Academic Press, London, UK, 600 p.
- Kim, J.T., Kim, G.B., Chung, I.M. and Jeong, G.C., 2014, Analysis of flow duration and estimation of increased groundwater quantity due to groundwater dam construction. *The Journal of Engineering Geology*, 24, 91-99 (in Korean with English abstract).
- Kim, Y. and Kim, Y., 2010, A review on the state of the art in the management of aquifer recharge. *Journal of the Geological Society of Korea*, 46, 521-533 (in Korean with English abstract).
- 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 artificial recharge to reduce the ground-water drawdown of the riverbank filtration. *The Journal of Engineering Geology*, 14, 391-400 (in Korean with English abstract).
- Lee, H.Y. and Kim, S.W., 1964, Explanatory text of the geological map of Kumhae sheet, Scale 1:50,000. Technical Report Sheet-6919-I, Geological Survey of Korea (GSK), Seoul, Korea, 49 P, 1 map sheet, (in Korean and English).
- Lee, H., Koo, M.H. and Kim, Y., 2014, Determining optimal locations of an artificial recharge well using an optimization-coupled groundwater flow mode. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 19, 66-81 (in Korean with English abstract).
- Lee, J. and Kim, J.M., 2015, Three-dimensional numerical modeling of impacts of fresh water injection on groundwater flow and salt transport in a coastal aquifer due to urbanization of Suyeong-gu, Busan, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 51, 203-219 (in Korean with English abstract).
- Lerner, D.N., 2002, Identifying and quantifying urban recharge: a review. *Hydrogeology Journal*, 10, 143-152.
- Mallet, J.L., 1989, Discrete smooth interpolation. *Association for Computing Machinery (ACM) Transactions on Graphics (TOG)*, 8, 121-144.
- Masciopinto, C., 2006, Simulation of coastal groundwater remediation: The case of Nardò fractured aquifer in Southern Italy. *Environmental Modelling and Software*, 21, 85-97.
- Moon, S.H., Ha, K., Kim, Y., Koh, D.C. and Yoon, H., 2014, Examination for efficiency of groundwater artificial recharge in alluvial aquifer near Nakdong River of Changweon area, Korea. *Economic Environment Geology*, 47, 611-623.
- Oh, S.H., Kim, Y. and Koo, M.H., 2011, Modeling artificial groundwater recharge in the Hancheon drainage area, Jeju island, Korea. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 16, 34-45 (in Korean with English abstract).
- Paradigm, 2014, SKUA-GOCAD user guide. Manual, Paradigm, Houston, Texas, USA, various pages.
- Park, D., Koo, M.H. and Kim, Y., 2015, Hydrothermal numerical simulation for an artificial recharge test in a fractured rock aquifer. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 20, 65-75 (in Korean with English ab-

- stract).
- Park, G.Y., Yang, J.S., Kim, D.Y. and Kim, I.H., 2014, Analysis of the effect of artificial recharge to mitigate seawater intrusion in Taean, Proceedings of Korea Water Resources Association 2014, 296 (in Korean with English abstract).
- Park, J.H., Kihm, J.H., Kim, H.T. and Kim, J.M., 2008, Three-dimensional numerical simulation of impacts of fault existence on groundwater flow and salt transport in a coastal aquifer, Busan, Korea. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 13, 33-44 (in Korean with English abstract).
- Phien-wej, N., Giao, P.H. and Nutalaya, P., 1998, Field experiment of artificial recharge through a well with reference to land subsidence control. *Engineering Geology*, 50, 187-201.
- Querner, E.P., 2000, The effects of human intervention in the water regime. *Ground Water*, 38, 167-171.
- Ryu, C.K., Kang, S. and Chung, S.G., 2005, Late Quaternary paleoenvironmental Changes in the Western Nakdong River Delta. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 26, 443-458 (in Korean with English abstract).
- Ryu, C.K., Kang, S., Chung, S.G. and Jeon, Y.M., 2011, Late Quaternary depositional environmental change in the northern marginal area of the Nakdong River delta, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 47, 213-233 (in Korean with English abstract).
- Seo, J.A., Kim, Y.C., Moon, D.C., Ko, G.W. and Kim, Y.J., 2014, Evaluation of surface infiltration rate in Hancheon reservoir, Jeju Island, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 50, 419-430 (in Korean with English abstract).
- Seo, J.A., Kim, Y.J., Kim, J.S. and Kim, Y., 2010, Development of evaluation method for potential artificial recharge site using GIS. Annual Meeting of the Geological Society of Korea, Oct. 27-30, Gyeongju, 1 p (in Korean).
- Shin, J.H. and Byun, J.M., 2010, Fresh water injection test in a fractured bedrock aquifer for the mitigation of seawater intrusion. *Economic and Environmental Geology*, 43, 371-379 (in Korean with English abstract).
- Tyler, S.W., Chapman, J.B., Conrad, S.H., Hammermeister, D.P., Blout, D.O., Miller, J.J., Sully, M.J. and Ginanni, J.M., 1996, Soil-water flux in the southern Great Basin, United States: temporal and spatial variations over the last 120,000 years. *Water Resources Research*, 32, 1481-1499.
- Won, B.H., Shin, J.H., Hwang, S.H. and Hamm, S.Y., 2013, An electrical resistivity survey for the characterization of alluvial layers at groundwater artificial recharge sites. *Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists*, 16, 154-162 (in Korean with English abstract).
- Won, K.S., Chung, S.Y., Lee, C.S. and Jeong, J.H., 2015, A study on the replacement of saline water by injecting fresh water into confined aquifer at the Nakdong River delta area with saline water. *The Journal of Engineering Geology*, 25, 215-225 (in Korean with English abstract).
- Yoo, D.G., Chang, J.H., Lee, H.Y., Kim, S.P., Nam, S.I. and Gong, K.S., 2004, Stratigraphy and depositional environment of Holocene deposits in the inner shelf off the Nakdong River mouth. *Journal of the Geological Society of Korea*, 40, 395-407 (in Korean with English abstract).
- Yoo, D.G., Kim, S.P., Chang, T.S., Kong, G.S., Kang, N.K., Kwon, Y.K., Nam, S.L. and Park, S.C., 2014a, Late Quaternary inner shelf deposits in response to late Pleistocene- Holocene sea level changes: Nakdong River, SE Korea. *Quaternary International*, 344, 156-169.
- Yoo, D.G., Kim, S.P., Lee, C.W., Chang, T.S., Kang, N.K. and Lee, G.S., 2014b, Late Quaternary transgressive deposits in a low-gradient environmental setting: Korea Strait shelf, SE Korea. *Quaternary International*, 344, 143-155.
- Zhang, X. and Yan, B., 1994, Artificial recharge and quality variation in Shanghai. In Johnson, A.I. and Pyne, R.D.G. (eds), *Artificial recharge of groundwater II*, ASCE, 568-573.

---

Received : June 10, 2016

Revised : July 25, 2016

Accepted : July 28, 2016