

낙동강 수변 지역의 해안 피압대수층 내 지하수 용질 이동특성 예비 평가

이성호 · 박대희 · 이영동 · 원경식[‡]
지오택컨설턴트(주)

요 약

지하수 인공함양을 통한 지하수 자원 확보 및 해수 침투 저감 가능성을 평가하기 위해 부산광역시 낙동강 삼각주내 해안 피압대수층을 대상으로 담수 주입 시험을 수행하였다. 2개의 시험정을 이용하여 담수 주입에 의한 시험정 내부와 주변 피압대수층의 염수 치환 그리고 기존 염수와 주입 담수의 수리학적 거동특성을 파악하였다. 관측 결과, 두 시험정 모두에서 지하수의 압력 수두는 깊이에 따라서는 정수압 상태에 있으며, 시간에 따라서는 증감이 눈에 띄지 않음을 보여준다. 이는 기존의 염수와 주입된 담수의 밀도 차이가 크지 않으며, 시험정에 압력 주입이 아닌 중력 배수로 담수를 주입하였기 때문인 것으로 판단된다. 두 시험정 모두에서 지하수의 온도는 압력 수두와는 다르게 시간에 따라서 증감이 뚜렷하다. 그리고 담수 주입 후에 시간이 지남에 따라서 지하수의 온도가 염수 취수 이전의 지하수의 온도로 빠르게 회복된다. 이는 주입된 담수가 PVC 파이프 면을 따라 주변 지층과 열전도에 의한 열교환을 빠르게 하였기 때문인 것으로 판단된다. 두 시험정 모두에서 지하수의 전기전도도 변화는 압력 수두 및 온도의 변화와 분명하게 다른 양상을 보여준다. 그리고 담수 주입 후에 시간이 지남에 따라서 지하수의 전기전도도가 유공관 구간에서는 상대적으로 빠르게 증가하지만 무공관과 유공관의 경계면과 점토층(반대수층) 하부면 사이 구간에서는 상대적으로 점진적으로 증가한다. 이와 같은 깊이에 따른 지하수의 전기전도도 분포의 시간적 변화 양상은 시험정 주변 지층의 수리전도도, 무공관과 유공관의 경계면 위치, 유공관의 개공률, 염수 취수율, 담수 주입율 등과 밀접하게 관계가 있는 것으로 판단된다.

주요어: 낙동강 삼각주, 해안 피압대수층, 염수 치환, 담수 주입, 지하수 관측

Sungho Lee, Daehee Park, Young-Dong Lee and Kyoung-Sik Won, 2016, Preliminary evaluation of groundwater solute behavior in a coastal confined aquifer of the Nakdong River area. *Journal of the Geological Society of Korea*. v. 52, no. 3, p. 237-245

ABSTRACT: In order to evaluate the possibility of artificial recharge of fresh water injection ensuring reduction of seawater intrusion and preserving groundwater resources, a series of injection tests were carried out in the coastal confined aquifer of Nakdong River delta, Busan Korea. Two boreholes were used to identify saline water replacement and hydraulic behavior between existing saline water and injected fresh water in the test holes and around the confined aquifer. The results of the fresh water injection tests and groundwater monitoring show that the pressure head of groundwater in the test wells is under hydrostatic condition and remains constant with time. This may be ascribed to the fact that the difference in density of saline water and fresh water is not significant, because fresh water is injected via gravity drain not pressure injection. In contrast to the pressure head, the temperature of groundwater in the test wells shows distinct distributional changes with time. In addition, after fresh water injection, the temperature of groundwater recovers rapidly to its original value of saline water temperature before pumping. This may arise because of the heat exchange through heat conduction between injected fresh water and surrounding geologic formations, which occurs quickly through the PVC pipe. The electrical conductivity of groundwater in the test wells shows clearly different patterns in contrast to the pressure head and temperature. After fresh water injection, the electrical conductivity of groundwater increases relatively rapidly with time in the region of the perforated drainpipe, whereas it increases gradually in the regions near the boundary of the non-perforated and perforated drainpipes, and the lower boundary of the clay layer (aquitard). Such patterns of the temporal changes of the electrical conductivity in vertical depth profiles may be closely related to the hydraulic conductivity of geologic formations surrounding the test wells, the boundary location of the non-perforated and

[‡] Corresponding author: +82-31-436-0830, E-mail: geoinfo@geoinfo.co.kr

perforated drainpipes, the opening ratio of the perforated drainpipes, the pumping rate of saline water, and the injection rate of fresh water.

Key words: Nakdong River delta, coastal confined aquifer, salt water replacement, fresh water injection, groundwater monitoring

(Sungho Lee, Daehee Park, Young-Dong Lee and Kyoung-Sik Won, Geotech Consultant Co. Ltd., Gunpo 15850, Republic of Korea)

1. 서 론

해수 침투(seawater intrusion)는 자연적 요인(강수량, 증발산량, 기후 변화, 조석, 해수와 담수의 밀도 차이 등)과 인위적 요인(지하수 개발, 산업화, 도시화 등)에 의해 해수가 해안 대수층(coastal aquifer)으로 침투하는 현상이다(Booh *et al.*, 2005). 특히 해수 침투는 전 세계적으로 연안에 위치한 지역에서 발생하고 이러한 해수 침투가 오랜 기간 동안 진행되면 지하 담수고갈, 지하 구조물 부식, 그리고 생태계 파괴 등의 심각한 문제가 발생한다. 따라서 해안 지역에서는 해수 침투를 예방하고 지하수 자원을 지속적으로 확보하기 위한 적절한 계획과 관리가 필요하다(Lee and Kim, 2015).

해수 침투를 저감하기 위한 방안으로는 (1) 지하수 양수량 감소(groundwater pumping reduction), (2) 양수정 재배치(pumping well relocation), (3) 불투수성 인공 방벽 설치(impermeable artificial barrier installation), (4) 인공 함양(artificial recharge) 등이 있다(Atkinson *et al.*, 1986; Abd-Elhamid and Javadi, 2008, 2010). 이 중에서 특히 인공 함양 중 관정을 통한 담수 주입 기법(fresh water injection scheme)은 좁은 지역에 많은 양의 담수를 함양시킬 수 있고 지하수위 회복, 해수 침투 저감, 지하수질 개선, 지반 침하 방지 등과 같은 많은 지하수방재 효과가 있기 때문에 전 세계 여러 나라에서 시행하고 있다(Kim *et al.*, 1998; Kim and Hamm, 2003).

국외에서 담수 주입 기법을 실제로 적용한 사례를 살펴보면 Phien-wej *et al.* (1998)은 태국 방콕 지역에서 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 실시

한 후 압력 수두와 염분 농도 측정을 통하여 담수 주입으로 인한 해수 침투 저감 효과를 확인하였다. 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. Masciopinto (2006)는 경계면 모델을 통해 이탈리아 남부 해안 지역에 존재하는 싱크홀(sinkhole)로 담수를 주입했을 때의 담수와 해수간의 경계면의 이동을 분석하였다.

한편 국내에서도 해수 침투 저감을 위한 담수 주입 시험이 전라남도 영광군 해안 지역에 적용되었다. Park *et al.* (2007)은 전라남도 영광군 해안 충적층에 담수를 주입한 후 시추공을 통하여 주입된 담수체의 거동과 영향 반경을 관측하였다. Shin and Byun (2010)은 동일한 지역에서 균열 암반의 해안 대수층 내에 담수를 주입한 후 지하수의 전기전도도가 점진적으로 감소하는 것을 관측하여 담수 주입 기법이 해수 침투 개선에 효과가 있음을 확인하였다. 아울러 담수 주입 기법을 해안 대수층 내에 적용하려면 상당히 오랜 시간과 많은 비용이 소요되기 때문에 이러한 기술을 적용하기 이전에 후보 지역에서 담수 주입 기법의 적용성 및 효용성에 대한 철저한 사전 타당성 조사가 선행되어야 한다(Lee and Kim, 2015).

본 연구의 목적은 해안 피압대수층 내 인공 함양을 통한 지하수저장 및 회수 실증 시설 구축의 사전 타당성 조사의 일환으로 담수 주입에 의한 염수 치환과 기존 염수 및 주입된 담수의 수리적 거동 특성을 효과적으로 파악하고 인공 함양을 통한 지하수 자원 확보 및 해수 침투 저감의 가능성을 예비적으로 평가하는 것이다. 이를 위해 연구지역 피압대수층 내에 설치된 2개의 관측정을 선별하여 시험정으로 이용하였으며 담수의 주입과 이에 따른 대수층 내 지하수 변화를 관측하였다.

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 피복을 하고 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).

해안에 위치하는 연구 지역은 해수와 담수의 밀도 차이 및 조석의 해수면 차이(sea tide)로 인한 해수 침투(seawater intrusion)는 물론이고 해저 지하

수 유출(submarine groundwater discharge)이 발생하여 수리지질학적으로 지하수 유동 및 염분 이동이 매우 역동적이고 복잡한 지역으로 알려져 있다.

3. 시험정 특성

연구 지역에는 대규모 청정 지하 저수지 개발의 연구 목적으로 피압대수층 관측정 11개(MWc-1~MWc-11), 자유면대수층 관측정 3개(MWu-1~MWu-3), 주입정 4개(IW-1~IW-4), 복합관측주입정 9개(OIW-1~OIW-9), 양수정 8개(PW-1~PW-8)가 설치되어 있다. 본 연구에 앞서 설치된 시추공의 지하수위 측정 결과, 자유면대수층의 지하수위는 약 GL.-0.85 m에 형성되어 있으며, 피압대수층의 경우 GL.-0.55~-1.21 m에 지하수위가 형성되어 있다. 이 중에서 피압대수층 관측정 MWc-3(지하수위: GL.-1.21 m)과 MWc-11(지하수위: GL.-0.98 m)을 시험정(test wells)으로 이용하여 시험정 내부와 시험정 주변 피압대수층의 염수를 담수로 치환하는 일련의 담수 주입과 지하수 관

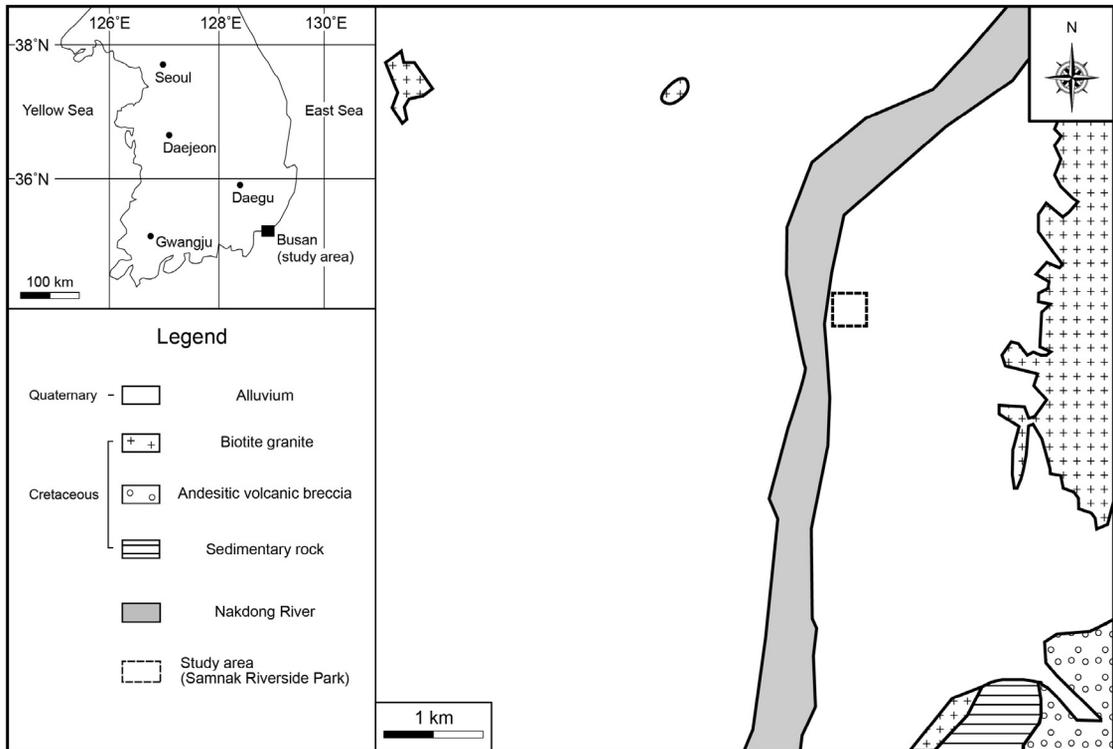


Fig. 1. Location and geologic maps of the study area. The geologic map is modified from Lee and Kim (1964).

측을 수행하였다(그림 2a).

그림 2b는 두 시험정의 지질 주상도이다. 최하부에는 화강암이 기반암으로 분포하며, 상부로 가면서 자갈과 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 자갈층 두께는 MWc-3에서 0.5 m이고 MWc-11에서 5.5 m이며, 모래층 두께는 MWc-3에서 33.5 m이고 MWc-11에서 36.5 m이다. 반대수층인 점토층 두께는 MWc-3에서 17.5 m이고 MWc-11에서 18.5 m이다. 상부 대수층인 모래층 두께는 MWc-3에서 7.5 m이고 MWc-11에서 8.5 m이다. 한편 MWc-11의 경우 지표면으로부터 67.0 m 심도에 화강암으로 이루어진 기반암이 존재한다(그림 2b).

4. 담수 주입 및 지하수 관측

그림 3은 시험정의 전체적인 모식도이다. 시험정은 지표로부터 유입 가능한 오염 물질로부터 보호하기 위해 보호 박스로 감싸져 있으며, 그 내부에는 직경 60 mm의 케이싱(casing)과 직경 54 mm의 PVC 파이프가 설치되어 있다. PVC 파이프는 무공관(non-perforated pipe)과 유공관(perforated pipe) 구간(interval, region)으로 나누어진다. 무공관 구간은 상부 자유면대수층, 반대수층 및 하부 피압대수층의 상부 일부분을 포함하고 있으며, 유공관 구간은 하부 피압대수층의 나머지 부분 및 기반암을 포함한다(그림 3).

담수 주입 시험은 2016년 4월 19일(MWc-11), 20일(MWc-3)에 걸쳐 수행하였다. 담수 주입에 의한 시험관정의 전기전도도 분포 및 온도 변화를 관측하였다. 담수 주입과정에서는 피압대수층의 염지하수

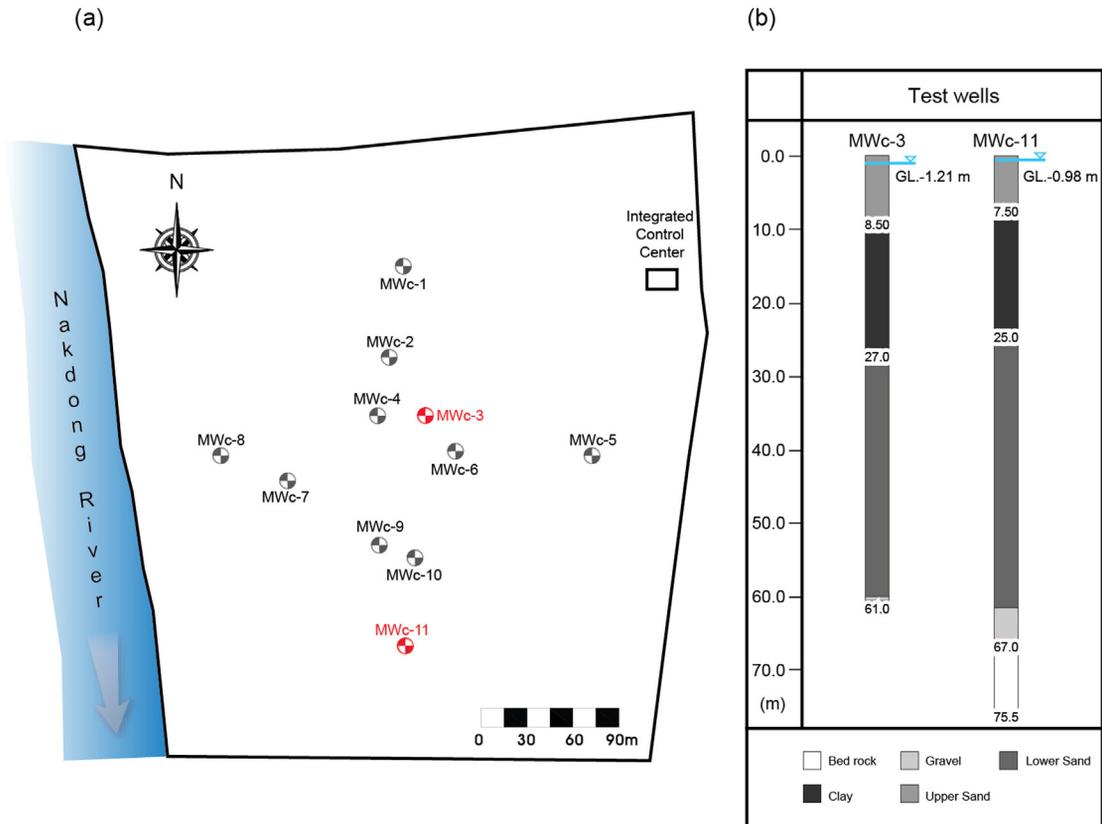


Fig. 2. (a) Configuration and (b) geologic columns of the test wells.

(염수)를 일정 시간(약 1시간)동안 취수하여(양수기 SEV-50X, 최대 취수 가능량 620 L/Min) 시험정의 무공관과 유공관을 염수로 가득 채운 후에 시험정에 압력을 가하지 않고 중력 배수(gravity drain)로 담수를 주입하여 담수가 시험정의 무공관과 유공관에 존재하는 염수를 치환하였다. 이를 위하여 먼저 각 시험정의 무공관과 유공관 구간의 길이와 부피를 파악하여 이론적인 담수 주입량(theoretical injection capacity)을 산정하였다(표 1). 표에서 보듯이 시험정 MWc-3과 MWc-11의 이론적인 담수 주입량은(담수의 밀도

를 $1,000 \text{ kg/m}^3$ 로 가정하였을 때) 각각 139.7 L와 172.9 L로 계산되었다. 이에 따라 20.0 L 플라스틱 용기에 담수를 담아 각각 7회(140.0 L)와 9회(180.0 L)에 걸쳐 반복적으로 시험정에 주입하였다. 주입된 담수는 낙동강의 원수(source fresh water)를 취수하였으며, 현장 여건상 화학적 및 생물학적 전처리하는 수행하지 않았다. 다만 물넘이 방식을 이용한 다단계 수조를 만들어 부유 물질을 제거한 후에 담수 주입에 사용하였다. 염수의 온도는 약 $16.0\sim 16.5^\circ\text{C}$ 이며, 담수의 온도는 약 $19.0\sim 20.4^\circ\text{C}$ 이다.

지하수 관측에서는 MWc-3과 MWc-11에서 염수 취수 이전(before salt water pumping)에 각 1회, 염수 취수 직후(right after salt water pumping)에 각 1회, 담수 주입 후(after fresh water injection)에 각 4회에 걸쳐 CTD 다이버(conductivity, temperature, and water depth diver)를 이용하여 지하수의 압력 수두(pressure head), 온도(temperature), 전기전도도(electrical conductivity, EC) 값을 주기적으로 측정하였다. 염수 취수 이전에 관측한 값은 평형의 초기 이전 정상 상태(pre-initial steady state)를 보여주며, 염수 취수 직후에 관측한 값은 시험정 내부를 채운 염수로 가득 채운 초기 상태(initial state)를 보여주며, 담수 주입 후에 관측한 값은 시험정에 담수를 주입하여 염수를 치환하는 비정상 상태(transient state)를 보여준다.

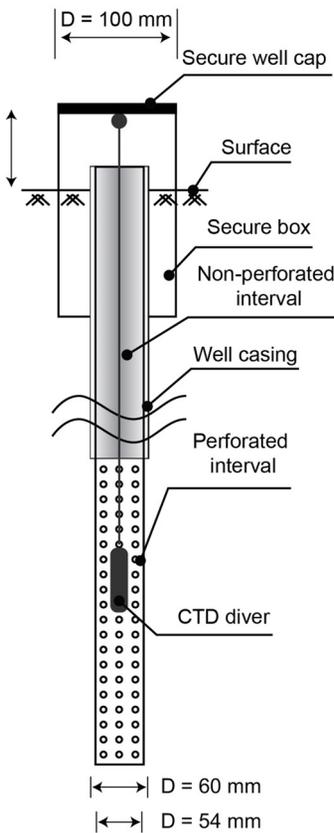


Fig. 3. Schematic diagram of the test wells.

5. 담수 주입 및 지하수 관측 결과

그림 4는 담수 주입 전, 중, 후의 여러 특정 시점에서 MWc-3과 MWc-11에서 깊이에 따른 지하수의 압력 수두, 온도, 전기전도도 값에 대한 일차원 심도 프로파일을 CTD 다이버를 이용하여 관측한 결과이다.

그림 4a와 그림 4b는 각각 MWc-3과 MWc-11에서 깊이에 따른 지하수의 압력 수두 분포의 시간적 변화를 보여준다. 그림에서 보듯이 두 시험정 모

Table 1. Length and volume of non-perforated and perforated pipes of the test wells.

Test wells	Length of non-perforated pipe (m)	Volume of non-perforated pipe (m^3)	Length of perforated pipe (m)	Volume of perforated pipe (m^3)	Total volume (m^3)
MWc-3	32.0	7.33×10^{-2}	29.0	6.64×10^{-2}	13.97×10^{-2}
MWc-11	34.0	7.79×10^{-2}	41.5	9.50×10^{-2}	17.29×10^{-2}

두에서 지하수의 압력 수두는 깊이에 따라서는 정수압 상태(hydrostatic condition)에 있으며, 시간에 따르는 변화가 눈에 띄지 않는다. 이는 기존의 지하수와 주입된 담수의 밀도 차이가 크지 않으며, 시험정에 압력 주입이 아닌 중력 배수로 담수를 주입하였기 때문인 것으로 판단된다.

그림 4c와 그림 4d는 각각 MCw-3과 MWc-11에서 깊이에 따른 지하수의 온도 분포의 시간적 변화를 보여준다. 그림에서 보드시피 두 시험정 모두에서 지하수의 온도는 압력 수두(그림 4a, 4b)와는 다르게 시간에 따라서 증감이 뚜렷하다. 염수 취수 이전에는 지하수의 온도가 점토층(반대수층) 하부면을 경계로 그 상부(반대수층 및 자유면대수층)에서는 지표면에 가까워지면서 하강하다가 다시 상승하며, 그 하부(피압대수층)에서는 MCw-3에서는 16.0°C로 거의 일정하게 유지되며, 반면 MCw-11에서는 16.5°C ~ 17.0°C 범위의 온도를 갖는다. 염수 취수 직후에는 지하수의 온도가 시험정 전체에 걸쳐서 MCw-3에서는 16.0°C로, MCw-11에서는 16.5°C로 거의 일정하게 유지된다. 이는 하부 피압대수층에서 취수한 염수로 시험정 내부를 가득 채웠기 때문인 것으로 판단된다. 담수 주입 직후에는 지하수의 온도가 지표면 근처에서는 하강하다가 일정 심도 이하에서는 일정하게 유지된다. 이는 담수 주입에 의한 염수 치환이 완벽하게 가파른 경계면(sharp interface)을 가지는 염수 부피 대 담수 부피의 전이(displacement)가 아니라 주로 염수와 담수의 혼합(mixing)의 형태로 발생하였기 때문인 것으로 판단된다. 그리고 담수 주입 후에 시간이 지남에 따라서 지하수의 온도가 염수 취수 이전의 지하수의 온도로 빠르게 회복된다. 이는 주입된 담수가 PVC 파이프 면을 따라 주변 지층과 열전도(heat conduction)에 의한 열교환(heat exchange)을 빠르게 하였기 때문인 것으로 판단된다.

그림 4e와 그림 4f는 각각 MCw-3과 MWc-11에서 깊이에 따른 지하수의 전기전도도 분포의 시간적 변화를 보여준다. 그림에서 보드시피 두 시험정 모두에서 지하수의 전기전도도는 압력 수두(그림 4a, 4b) 및 온도(그림 4c, 4d)와는 분명하게 다른 양상을 보여준다. 염수 취수 이전에는 지하수의 전기전도도가 두 시험정 모두에서 특정 깊이 이상에서 가파르게 계단형(stepwise)으로 증가한다. 염수 취수 직후에는 염수가 유공관을 통해 유입되어 지하수의 전기

전도도가 시험정 전체에 걸쳐서 염수 취수 이전보다는 높으며, MCw-3에서는 전체적으로 일정하지 않지만 MWc-11에서는 전체적으로 일정하다. 담수 주입 직후에는 지하수의 전기전도도가 두 시험정 모두에서 무공관 구간에서는 일정하지만 무공관과 유공관의 경계면에서 가파르게 변한다. 또한 지하수의 전기전도도가 MWc-3의 유공관 구간에서는 깊이가 깊어지면서 두 번에 걸쳐 크게 증가한다. 그리고 담수 주입 후에 시간이 지남에 따라서 지하수의 전기전도도가 유공관 구간에서는 상대적으로 빠르게 증가하지만 무공관과 유공관의 경계면과 점토층(반대수층) 하부면 사이 구간에서는 상대적으로 점진적으로 증가한다.

상기한 바와 같은 깊이에 따른 지하수의 전기전도도 분포의 시간적 변화 양상(그림 4e, 4f)은 시험정 주변 지층의 수리전도도(hydraulic conductivity), 무공관과 유공관의 경계면 위치(boundary location), 유공관의 개공률(opening ratio), 염수 취수율(pumping rate), 담수 주입율(injection rate) 등과 밀접하게 관계가 있는 것으로 판단된다. 즉 염수 취수 직후에 시험정별로 깊이에 따른 지하수의 전기전도도 분포 양상이 서로 다른 이유는 시험정 주변 지층의 수리전도도, 무공관과 유공관의 경계면 위치, 유공관의 개공률, 염수 취수율 등이 시험정별로 서로 다르기 때문인 것으로 판단된다. 담수 주입 직후에 시험정별로 깊이에 따른 지하수의 전기전도도 분포 양상이 서로 다른 이유는 시험정 주변 지층의 수리전도도, 무공관과 유공관의 경계면 위치, 유공관의 개공률, 담수 주입율 등이 시험정별로 서로 다르기 때문인 것으로 판단된다. 그리고 담수 주입 후에 시간이 지남에 따라서 시험정별로 깊이에 따른 지하수의 전기전도도 분포 양상이 서로 다른 이유는 시험정 주변 지층의 수리전도도, 무공관과 유공관의 경계면 위치, 유공관의 개공률 등이 시험정별로 서로 다르기 때문인 것으로 판단된다.

6. 결론

지하수 인공함양을 통한 지하수 자원 확보 및 해수 침투 저감 가능성을 평가하기 위해 부산광역시 낙동강 삼각주내 해안 피압대수층을 대상으로 담수 주입 시험을 수행하였다. 2개의 시험정을 이용하여

시험정 내부와 주변 피압대수층의 담수 주입에 의한 염수 치환 그리고 기존 염수와 주입 담수의 거동특성을 파악하였다. 담수 주입 과정에서는 시험정 하부 피압대수층의 염지하수(염수)를 일정 시간 취수하여 시험정의 무공관과 유공관 구간을 취수한 염수로 가득 채운 후에 시험정에 압력 주입이 아닌 중력 배수로 담수를 주입하여 담수가 시험정의 무공관과

유공관에 존재하는 염수를 치환하였다. 지하수 관측에서는 시험정 MWc-3과 MWc-11에서 염수 취수 이전에 각각 1회, 염수 취수 직후에 각각 1회, 담수 주입 후에 각 4회에 걸쳐 CTD 다이버를 이용하여 지하수의 압력 수두, 온도, 전기전도도 값을 주기적으로 측정하였다. 담수 주입 및 지하수 관측 결과는 두 시험정 모두에서 지하수의 압력 수두는 깊이에

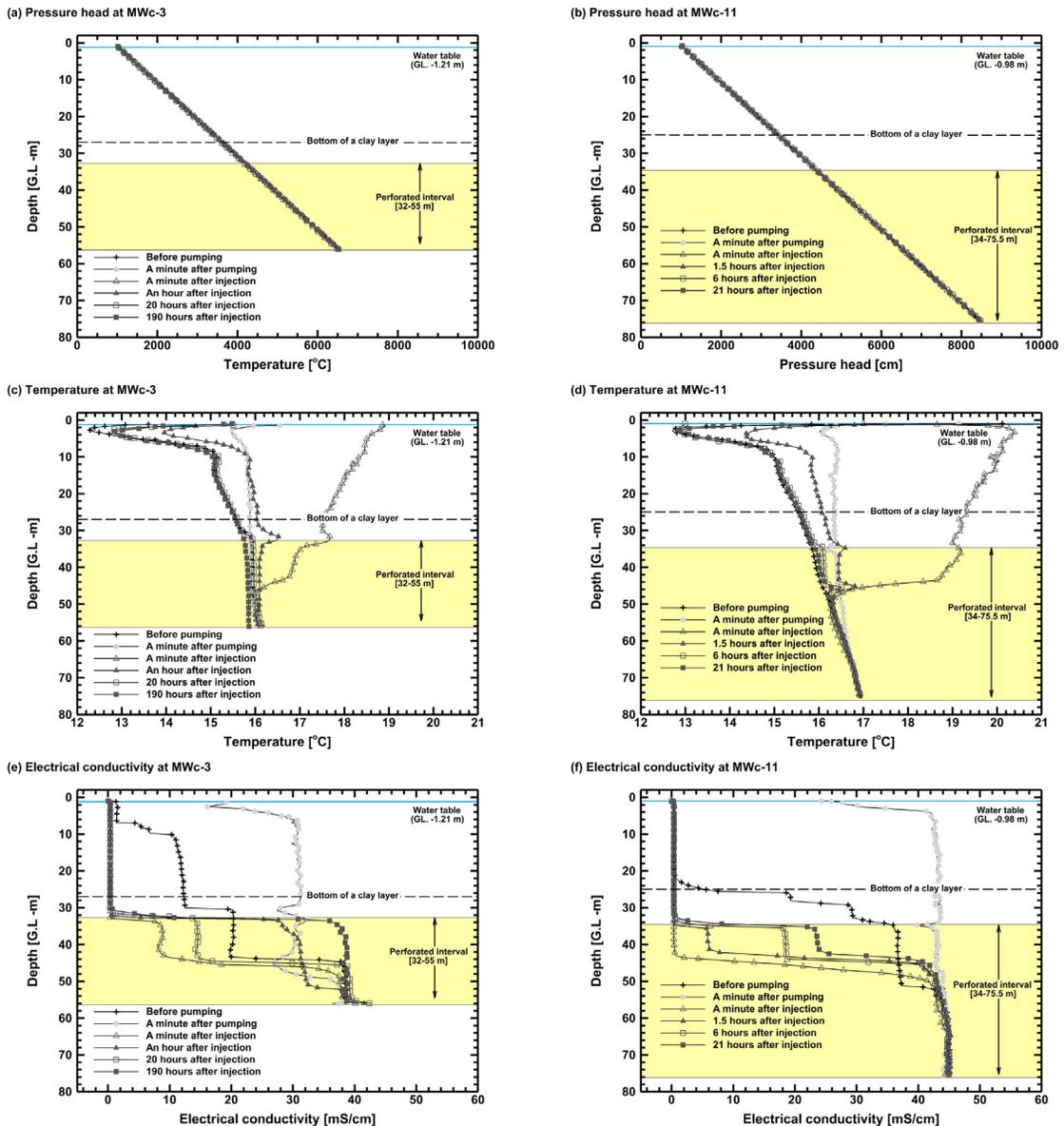


Fig. 4. Temporal changes in vertical depth profiles of (a, b) pressure head, (c, d) temperature, and (e, f) electrical conductivity in the test wells MWc-3 (left column) and MWc-11 (right column).

따라서는 정수압 상태에 있으며, 시간에 따라서는 증감이 눈에 띄지 않음을 보여준다. 이는 기존의 염수와 주입된 담수의 밀도 차이가 크지 않으며, 시험정에 압력 주입이 아닌 중력 배수로 담수를 주입하였기 때문인 것으로 판단된다. 두 시험정 모두에서 지하수의 온도는 압력 수두와는 다르게 시간에 따라서 변화가 뚜렷하다. 그리고 담수 주입 후에 시간이 지남에 따라서 지하수의 온도가 염수 취수 이전의 지하수의 온도로 빠르게 회복된다. 이는 주입된 담수가 PVC 파이프 면을 따라 주변 지층과 열전도에 의한 열교환을 빠르게 하였기 때문인 것으로 판단된다. 두 시험정 모두에서 지하수의 전기전도도는 압력 수두 및 온도와는 분명하게 다른 변화양상을 보여준다. 그리고 담수 주입 후에 시간이 지남에 따라서 지하수의 전기전도도가 유공관 구간에서는 상대적으로 빠르게 증가하지만 무공관과 유공관의 경계면과 점토층(반대수층) 하부면 사이 구간에서는 상대적으로 점진적으로 증가한다. 이와 같은 깊이에 따른 지하수의 전기전도도 분포의 시간적 변화 양상은 시험정 주변 지층의 수리전도도, 무공관과 유공관의 경계면 위치, 유공관의 개공률, 염수 취수율, 담수 주입율 등과 밀접하게 관계가 있는 것으로 판단된다. 본 연구에서 수행한 이러한 예비 평가 및 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 본 논문의 편집위원을 맡아주신 이진용 교수님, 그리고 심사 과정에서 발전적인 조언과 비판을 해주신 두 심사자님께 깊은 감사를 드립니다. 끝으로 본 논문을 검토해 주신 김준모 선생님과 김천수 박사님께 진심어린 감사를 드립니다.

REFERENCES

- Abd-Elhamid, H.F. and Javadi, A.A., 2008, An investigation into control of saltwater intrusion considering the effects of climate change and sea level rise. Proceedings of the Twentieth Salt Water Intrusion Meeting (SWIM), Naples, Florida, USA, June 23-27, 4-7.
- Abd-Elhamid, H.F. and Javadi, A.A., 2010, A simulation-optimization model to study the control of seawater intrusion in coastal aquifers using ADR methodology. Proceedings of the Twenty-First Salt Water Intrusion Meeting (SWIM), Azores, Portugal, June 21-26, 173-176.
- Atkinson, S.F., Miller, G.D., Curry, D.S. and Lee, S.B. (eds.), 1986, Salt Water Intrusion: Status and Potential in the Contiguous United States. Lewis Publishers, Chelsea, Michigan, USA, 390 p.
- Booh, S.A., Song, S.H., Lee, G.S., Kim, J.S. and Kim, H.B., 2005, A study on prevent seawater intrusion and artificial groundwater recharge. Technical Report, Rural Research Institute (RRI), Korea Agricultural and Rural Infrastructure Corporation (KARICO), Ansan, Korea, 55 p (in Korean).
- 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.
- 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.
- Kim, H.S., Baik, K.H., Hahn, C., Ryu, J., Park, H. and Won, J.H., 1998, A study on artificial groundwater recharge and enlargement of groundwater use (1st year). Interim Report WRRRI-GG-98-4, Water Resources Research Institute (WRRRI), Korea Water Resources Corporation (KWRC), Daejeon, Korea, 104 p (in Korean with English bibliographic data sheet).
- Kim, H.S. and Hamm, S.Y., 2003, Development of artificial groundwater recharge technologies. Proceedings of the Symposium on Sustainable Development, Utilization, and Management of Twenty-First Century Groundwater Resources, Daejeon, Korea, May 30, 39-55 (in Korean).
- 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, 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

Abd-Elhamid, H.F. and Javadi, A.A., 2008, An investigation into control of saltwater intrusion considering

- urbanization of Suyeong-gu, Busan, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 51, 203-219 (in Korean with English abstract).
- Masciopinto, C., 2006, Simulation of coastal groundwater remediation: The case of Nardò fractured aquifer in Southern Italy. *Environmental Modelling and Software*, 21, 85-97.
- Park, K.G., Shin, J., Hwang, S. and Park, I., 2007, Fresh water injection test to mitigate seawater intrusion and geophysical monitoring in coastal area. *Geophysics and Geophysical Exploration*, 10, 353-360 (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.
- 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).
- Shin, J. and Byun, J., 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).
- 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.

Received : May 31, 2016

Revised : June 24, 2016

Accepted : June 24, 2016