

서천 길산천 소유역의 고염분 지하수 수질과 산출 특성

문상호* · 이봉주* · 박권규 · 고경석

한국지질자원연구원 지구환경연구본부 지하수토양연구실

Hydrogeochemical Characteristics and Occurrences of High-Saline Ground Water at Seocheon Area, Korea

Sang-Ho Moon*, Bong-Joo Lee*, Kwon Gyu Park and Kyung-Seok Ko

Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon, 305-350, Korea

High-saline ground water, whose electrical conductivity value ranges from 12,000 to 21,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, occurs at the small catchment of Gilsan stream near Geum-river estuary dike. These high-saline ground water comes from three different aquifers consisting of two horizons of sand sediments and one weathered zone with top part of unconformity. For these three aquifers showing mutual independence in terms of hydrogeological and hydrogeochemical connection, we examined characteristics of aquifer occurrences and their water chemistry, and observed and analyzed the fluctuations of the ground water level and electrical conductivity. Our study results indicate that the high-saline characteristics of ground water in this study area should not come from dynamic recent seawater intrusion, but might be due to the fossil saline water included and isolated within the paleo-sediments or weathered zone and their upper unconformity part. This high-saline water seems to be now partially mixed and affected by freshwater in the higher inland reach of Gilsan stream.

Key words : Seocheon, Gilsan stream, high-saline ground water, fossil saline water

서천지역 금강하구둑 부근의 길산천 소유역에서 전기전도도 12,000~21,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 고(高)염분 지하수가 산출된다. 이러한 고염분 지하수 대수층은 심도를 달리하는 2개 모래질 퇴적층과 1개 풍화대 및 부정합면으로 구성되어 있으며, 대수층 상호간에는 수리지질 및 수리지화학적으로 단절된 양상을 보인다. 연구지역에서 산출되는 고염분 지하수의 기원에 대하여 고찰해 보기 위해, 대수층의 산출 특성, 지하수의 수질 특성, 지하수위 및 전기전도도의 시계열 관측과 주기 분석이 검토되었다. 국내 서남해안지역에서 해수의 영향을 받은 지하수 수질은 주로 현재 진행중인 해수침투 개념에 의해 설명되는 경향이였다. 하지만 이번 연구결과 길산천 소유역 하류지역에서 보이는 고(高)염분 지하수의 수질 및 산출 특성은 해수침투라는 역동적인 메카니즘에 의한 것이 아니라, 과거 지질시대의 조간대 퇴적물내 혹은 매립지내에 포켓상으로 고립 포획된 고(古)염분 성분에 의한 것으로 해석되었다.

주요어 : 서천, 길산천 소유역, 고(高)염분 지하수, 고(古)염분 성분

1. 서 론

우리나라 서·남해안 일대에서는 해안으로부터 1~10 km 범위 내 관정들의 약 46% 정도가 해수의 영향을 받은 것으로 보고된 바 있다(Lee *et al.*, 2003). 서천지역도 서해 입해지역으로서 지하수에 대한 해수의 영향이 우려되는 지역으로 현재 국가 해수침투 관

측망이 운영되고 있는 상황이다(MAF, 2006). 탐문조사 결과, 서천군 화양면 일대의 주민들도 염분이 많은 지하수를 농업 및 생활용수로 이용해온 것으로 보인다. 해안지대에서 해수 영향을 직접적으로 받고 있는 대수층을 개발하게 되면, 해수의 영향을 받지 않던 상·하부 담수 대수층까지도 추가로 오염시키는 경우가 발생될 수 있다. 따라서, 해안 지하수 자원을 지속적, 효율

*Corresponding author: msh@kigam.re.kr, bjlee@kigam.re.kr

적으로 개발 및 이용하기 위해서는 해수침투의 범위 혹은 고(高)염분 지하수의 분포를 면밀히 파악할 필요가 있고, 지하수 이용에 따른 수질 특성 변화, 염지하수의 기원 및 지하수의 염분화 과정 등에 대한 이해가 필요하다.

우리나라 연안지역 내 담수 대수층으로의 해수침투 원인에 대하여는 많은 연구 보고가 있었다. Park *et al.*(2002), Lee *et al.*(2003)은 충적 대수층에 대한 해수 침투로 인한 지하수 염분화를 보고하였으며, Chi *et al.*(2003)은 해수침투와 해무의 영향을 언급하였다. Hwang *et al.*(2005), Lee and Hwang(2008)은 암반 대수층의 파쇄대를 통한 해수침투를 지하수 염분화의 주요한 원인으로 해석하였다. 이와 같은 해수침투 이외에도 지하수 염분화의 원인은 퇴적기원의 고(古)염분 지하수(fossil saline water within sediments; Akouvi *et al.*, 2008), 암염 용해(halite dissolution; Freeman, 2007), 농업 유출수(agricultural effluents), 제설용 소금(road salt) 등 다양하게 알려져 있다. 우리나라 서해안에는 해수면 변화나 일부 간척에 의한 잔류 염분의 영향으로 인해 고(高)염분 지하수가 많이 분포할 것으로 간주되어 왔다. 그러나, 지금까지 국내 해안지대에서의 지하수 염분화 현상에 대하여는 충적층이든 암반이든 담수 대수층으로의 해수침투이라는 동적인 현상에만 집중하여 해석해 온 경향이 있으며, 원래 퇴적기원의 고(古)염분 지하수 혹은 조간대 해안 매립지에서 포켓상으로 고립 형성된 염지하수에 의한 지하수 염분

화 현상 및 이의 모델 제시는 없었다.

Lee and Moon(2008)은 서천지역의 해수침투 정도 및 영향 범위를 보고하였다. 또한, Lee and Moon(2008)은 서천-군산지역의 지하수 관측망(MOCT *et al.*, 2003)에서 취득한 수질 분석 자료의 통계처리와 지하수위 시계열의 신호분석을 수행하였으며, 이를 통해 주요 해수 침투 경로로서의 충적층과 암반 대수층 간의 상대적 비중에 대해서도 논의하였다. 이번 연구에서는 서천지역 지하수 중 전기전도도가 10,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이상의 고(高)염분 특성을 보이는 길산천 유역의 화양면 장성리-고마리 일대의 지하수에 대한 수질 및 산출 특성과, 시추조사, 대수층 특성 시험 및 수위/수질의 시계열 자료 분석 등을 통하여 고(高)염분 지하수의 기원 및 해수침투와의 연관성 여부 등을 검토하였다.

2. 수리지질환경

서천지역은 서해 및 금강 하류와 접하고 있으며, 농경지(39.6%)에 비해 임야(41.7%)의 점유 비율이 높은 지역이다. 농업용수의 경우 대부분 금강에서 유입되는 관개용수를 이용하나, 생활용수의 경우 간이상수도 또는 지하수에 의존하는 실정이다. 서천지역의 하천들은 금강 하구둑에 의해 해수와 차단되어 있으며, 주로 농업용수로 이용되고 있다. 연구지역인 화양면 장성리-고마리 일대에는 길산천이 남북으로 관통하여 흐르고 있어 길산천을 중심으로 소유역을 형성하고 있다. 길산

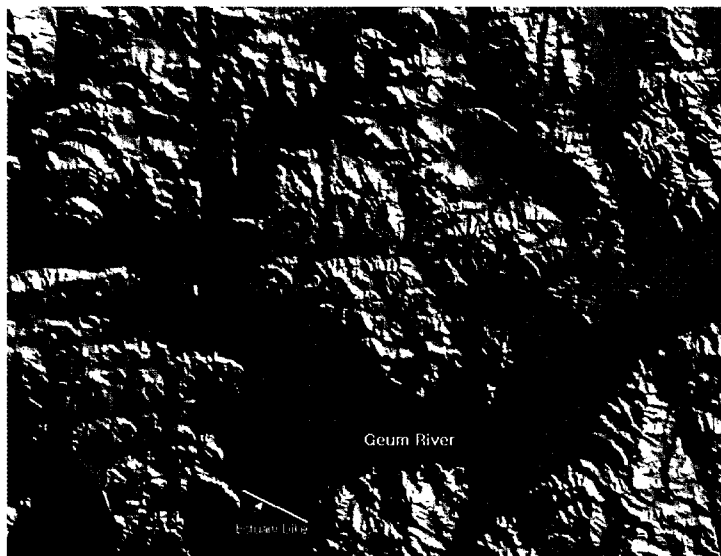


Fig. 1. Study area and location of test boreholes.

천은 북쪽의 봉선지와 문산저수지 부근으로부터 남쪽 방향의 기산면 산정리-두북리-두남리, 서천읍 화금리-두왕리-삼산리, 화양면 장상리-고마리 일대를 지나 소유역을 형성하며 흐르다가 금강하구둑 가까이에서 금강에 합류된다(Fig. 1).

서천지역의 지질은 선캠브리아기의 편암 및 편마암류, 고생대 변성퇴적암류, 쥐라기-백악기 화성암류 및 퇴적암류, 신생대 충적층 및 매립층 등으로 구성되어 있다(MOCT *et al.*, 2003). 선캠브리아기의 편암류와 쥐라기의 화강암 및 섬록암 분포지역 그리고 단열계 발달지역은 풍화대가 두터운 저지대를 이루는데 반하여, 선캠브리아기의 화강편마암, 고생대의 변성퇴적암류, 쥐라기와 백악기의 퇴적암류 분포지역은 풍화대가 얇게 발달하며 비교적 고지대를 이룬다. MOCT *et al.*(2003)에 의하면, 저지대의 풍화대가 두텁게 발달하는 지역에서는 최상부의 매립토와 그 하부의 충적층이 30 m 내외의 층후를 이룬다. 매립토는 주로 점토, 실트 모래와 암편으로 구성되며, 충적층은 점토, 실트, 모래 그리고 자갈 등으로 구성되며 위치에 따라 차이는 있으나 약 30 m의 층후를 갖는 것으로 보고되어 있다.

연구지역인 서천군 화양면 장상리-고마리 일대에는 대부분 경작지로 이용되는 간척지와 충적층, 그리고 이들 하부 기반암인 화강편마암 혹은 화강암이 분포하며 대수층을 구성한다. 전기비저항탐사 및 탄성파 굴절법 탐사 결과(Park K. G., 2008), 연구지역에서 지표로부터 기반암까지의 깊이는 약 30~40 m 정도로 깊고, 풍화대의 두께도 약 10 m 내외로서 두터운 것으로 추정된다. MOCT *et al.*(2003)에 의하면, 서천읍 화금리 일대 충적층(관정 심도 17.1 m) 및 암반(관정 심도 81.5 m) 지하수 관정의 투수량계수는 각각 24.20 m²/day, 5.2 m²/day 내외로서 길산천 소유역내에서도 중상류 지역에 분포하는 충적층 및 암반 대수층의 수리적 특성을 반영하는 것으로 보인다.

3. 자료 및 방법

3.1. 시추조사

우물조사 및 요인분석 결과를 토대로 서천지역 중 고염분 지하수가 분포할 것으로 추정되는 지역을 선정하여 시추조사를 실시하였다. 시추 위치는 Fig. 1과 같으며, 화양면 장상리-고마리 일대에 3개공을 포함하여 길산천 소유역내에서 북측으로 가면서 기산면 두북리 일대에 2개공, 기산면 산정리 일대에 2개공으로 모두

7개 공이 굴착되었다. 시추공의 구경은 모두 75 mm이며, 시추공 심도는 19.5~60.5 m 범위이다.

3.2. 수위/수질 관측 및 스펙트럼 분석

연구지역의 지하수위 변동 특성 및 원인을 파악하기 위해 시험시추공을 대상으로 지하수위 변화를 측정하였다. 지하수위 측정은 Van Essen Instrument 회사의 TD Diver를 이용하였으며, 이외에 전기전도도를 수위와 동시 관측할 수 있는 CTD Diver 그리고 대기압 관측용인 Baro-Diver도 동시 운용하였다. 각 계측기의 관측시간 간격은 1시간 단위로 설정하였으며, 매시정각에 관측하도록 하여 관측의 동기화를 구현하였다.

지하수위 변동의 주파수 특성은 지하수위 변동 원인에 따라 다르게 나타나므로, 지하수위 시계열의 주파수 특성을 분석하면 지하수위의 주기적 변동 원인을 해석할 수 있다(Freeze and Cherry, 1979; Lee *et al.*, 2001). 지하수위 시계열의 주기적 변동을 분석하기 위해 푸리에 변환을 이용하였으며, 시계열을 주파수 영역으로 변환하기 전에 이동 평균(running average)을 이용하였다. 이동 평균은 시계열의 고주파 성분을 smoothing하는 효과가 있기는 하나 시계열의 주파수 영역에서 특정 주파수 부분을 완전 분리시키지는 못하는 특성이 있다. 다만 그 사용이 단순하고 용이하여 개략적인 추세 제거에 널리 활용되는 일종의 필터이다. 이 연구에서는 24시간 연속자료 구간을 윈도우 크기로 하여 단순이동평균법을 적용, 구간별 이동평균을 구하였다. 푸리에 변환은 신호별 주파수 성분의 상대적인 크기를 알 수 있어 시간 영역의 신호를 분석하고 이해하는 데 필수적인 역할을 한다. N 개의 이산신호 x(n) (n=0, 1, ..., N-1)이 주어질 때 x(n)의 이산 푸리에 변환은 식 (1)과 같이 정의된다.

$$X(k) = D[X(n)] = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\frac{2\pi nk}{N}},$$

k=0, 1, ..., N-1 (k; 이산 주파수 변수) (1)

3.3. 양수시험

시추공의 양수 능력을 평가하고 시추공 주변의 수리적 특성을 파악하기 위해 7개 시험시추공(SCB-1~SCB-7)을 대상으로 양수시험을 실시하였다. 양수시험은 양수정 또는 관측정에서의 양수 및 회복에 따른 수위변화를 관측함으로써 이루어진다. 이를 통해 대수층의 수리적 특성을 나타내주는 수리상수(투수량계수, 저류계수)를 구할 수 있고, 그 값들의 분포를 파악하게

되면 조사지역의 지하수 산출 특성을 파악할 수 있게 된다. 투수량계수(T), 저류계수(S) 산정에는 다음과 같은 Jacob 방정식과 수위회복 자료를 이용하였다.

$$T = \frac{2.3Q}{4\pi \cdot \Delta s} \quad (Q; \text{양수량 } \Delta s; \text{양수시간 1 log cycle 에 서의 수위차}) \quad (2)$$

$$S = \frac{2.25T \cdot t_0}{r^2} \quad (t_0; \text{수위강하 0인 지점과 만나는 시간 절편, } r; \text{양수정과 관측정간의 거리}) \quad (3)$$

$$T = \frac{2.3Q}{4\pi \cdot \Delta s'} \quad (\Delta s'; t/t' \text{에 대한 1 log cycle에서의 수 위차, } t; \text{총 경과시간, } t'; \text{회복시간}) \quad (4)$$

4. 결과 및 해석

4.1. 고(高)염분 지하수의 분포

Lee and Moon(2008)은 서천-군산지역 지하수기초조사(MOCT *et al.*, 2003)의 지하수 수질분석 자료를 이용하여 요인분석을 실시하였으며, 그 결과로 해수침투 관련 요인점수가 높은 지역의 분포도를 제시한 바 있다. 금번 연구에서는 Lee and Moon(2008)의 요인분석 결과를 보완·수정하기 위해 우물조사를 별도로 수행하였으며, 이 자료들을 통합하여 해수침투 분포 범위를 수정하였다.

요인에 대한 부하량은 각 변수와 요인간의 상관관계를 나타내므로, 변수와 요인점수간의 상관관계 역시 부하량에 의해 대변된다. Fig. 2는 Lee and Moon(2008)에 의한 요인 1(해수침투 관련 요인) 점수와 전기전도도간의 상관관계를 나타낸 것으로 이들이 상호 직선적으로 1:1 대응하고 있음을 보인다. 금번 연구에서는 요인 1 점수와 전기전도도간의 상관관계를 이용하여 역으로 현장 우물조사에서 측정된 전기전도도를 요인 1 점수로 변환하고, 이를 Lee and Moon(2008)의 요인 1 점수 분포도에 추가하여 해수 침투 분포도를 다시 작성하였다(Fig. 3).

Fig. 3에서 보는 바와 같이, 서천의 해안지역과 금강 주변지역에서 요인 1의 점수가 높게 나타나며, 특히 금강 하구둑 북쪽을 연한 화양면 고마리-장상리 지역에서 고염분 지하수가 분포하고 있음을 알 수 있다. Fig. 3를 바탕으로 선정한 화양면 장상리-고마리 지역의 시험시추공의 지하수 전기전도도는 후술되는 바와 같이 10,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이상인 것으로 확인되었으며, Fig. 3의 분포 양상과 유사하게, 길산천을 따라 북부의 기산면 산정리 지역으로 가면서 지하수의 전기전도도가 낮아지고 있음이 시험시추 결과에서 확인되었다.

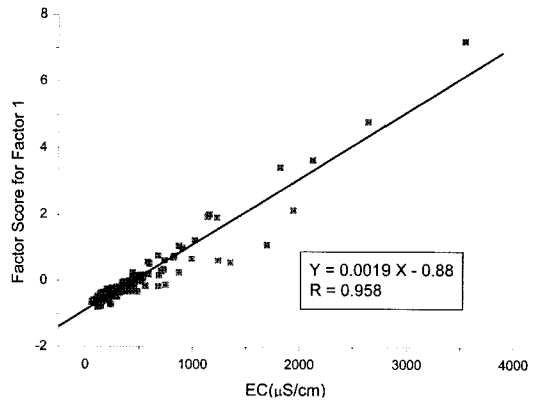


Fig. 2. Relation between factor 1 scores and EC values at Seocheon-Kunsan area.

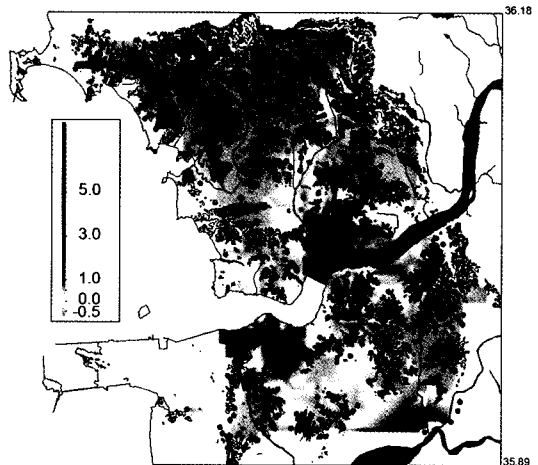


Fig. 3. Spatial distribution pattern of factor 1 scores at Seocheon-Kunsan area. Red color means high scores of factor 1, that is, high EC values (modified from Lee and Moon, 2008).

4.2. 고(高)염분 지하수의 산출 특성

시험시추공 주변의 지질 단면은 Fig. 4와 같다. 시추공에서의 지질은 최상부의 매립토, 하부의 미고결 퇴적층 그리고 최하부의 화강편마암 등으로 구성되어 있다. 미고결 퇴적층과 화강편마암간 부정합면의 심도는 21.6~34.5 m 범위로 추정되며, 남쪽에서 북쪽으로 가면서 그 심도가 얕아지는 경향을 보인다(Table 1).

심도가 가장 깊은 시추공을 포함하고 있는 SCB-1, 6, 7(화양면 장상리 소재)의 주상도에 의할 때, 이 지역에서 대수층 역할을 할 수 있는 지층은 4.1~7.3 m 심도 구간, 14.2~20 m 심도 구간, 25~30 m 심도 구간의 모래 퇴적층과 32.5~45 m 심도 구간에서 보이는 부정합 및 풍화암 구간인 것으로 파악되었다. 지표 가

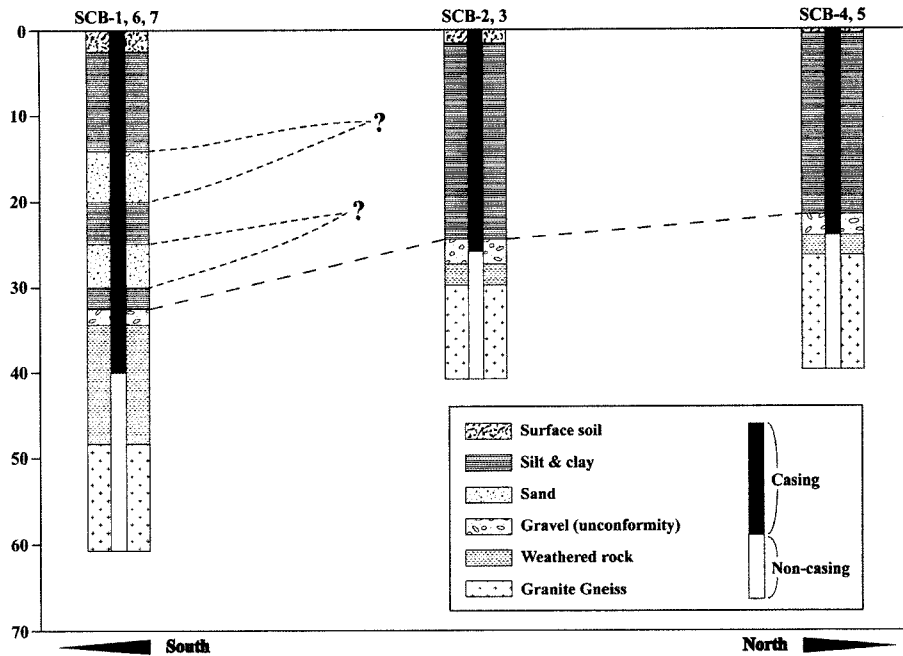


Fig. 4. Generalized geological cross section including three sites of test boreholes.

Table 1. General data for test boreholes, including kind of aquifer materials and their depths from surface, and the inferred depth of unconformity

Location	Well No.	Depth (m)		Aquifer material (their depth from surface)	Inferred depth of unconformity
		Well	Casing		
Southern area (lower reaches of Gilsan stream)	SCB-1	60.5	45.0	Unconformity or weathered zone (32.5~45.0 m)	32.5~34.5 m
	SCB-6	29.5	29.5	Sand sediments (26.5~29.5 m)	
	SCB-7	19.5	19.5	Sand sediments (18.2~19.5 m)	
Middle area	SCB-2	40.7	26.5	Unconformity or weathered zone (24.6~27.5 m)	24.5~27.5 m
	SCB-3	40.1	27.5	Unconformity or weathered zone (24.5~27.5 m)	
Northern area (upper reaches of Gilsan stream)	SCB-4	40.6	24.0	Unconformity or weathered zone (21.6~24.5 m)	21.6~24.0 m
	SCB-5	40.1	23.0	Unconformity or weathered zone (21.7~25.0 m)	

가이(4.1~7.3 m 심도 구간)를 제외하면, 시추공에서 관찰되는 모래층들은 연속성이 불량한 것으로 판단되며, 시추공 SCB-1, 6, 7에서 관찰되는 14.2~20 m 심도 구간의 모래층은 시추공 SCB-2, 3, 4, 5에서의 연속성이 불명하다(Fig. 4).

길산천 하류 지점에 위치한 시추공 SCB-1, 6, 7의 주요 대수층은 각각 32.5~45.0 m 심도 구간의 부정합 및 풍화암, 26.5~29.5 m 심도 구간의 모래 퇴적층, 18.2~19.5 m 심도 구간의 모래 퇴적층이다. 이 위치에서의 지하수 성분은 후술하는 바와 같이 EC 값이 모두 10,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이상의 고염분 특성을 보이는 것들이다. 이보다 북측(길산천 중류 및 상류 지점)에 위치한 시추

공들 SCB-2, 3, 4, 5의 대수층 심도는 21.6~27.5 m 범위로서 모두 부정합 혹은 풍화암 물질로 구성된다. 이들 대수층에서 산출되는 지하수의 EC 값은 후술하는 바와 같이 464~1,675 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 범위로서 남측의 시추공 SCB-1, 6, 7에서와는 다른 수질 특성을 보였다.

시험시추공 주변에서 산출되는 지하수 대수층의 수리적 특성을 파악하기 위하여 양수 및 회복시험을 실시하였다(Table 2). 양수시험 결과, 시험시추공 중 SCB-2와 SCB-4는 지하수량이 매우 적어 충분한 양수시험이 실시되지 못하였으며, SCB-6는 양수시 대수층 구성물질인 세립질 모래가 지하수와 함께 다량 토출되어 정상적인 양수시험이 불가능하였다.

Table 2. Details and results of pumping test for test boreholes

Well No.	Pumping rate (m ³ /day)	Pumping duration (min.)	Drawdown (m)	Recovery duration (min.)	T (m ² /day)	S (no unit)
SCB-1	17.68	90	0.98	73	21.61~23.16	-
SCB-6	-	35	2.93	-	-	-
SCB-7	15.94	100	4.75	60	1.98~3.40	-
SCB-2	9.18	18	18.51	60	0.08~1.53	8.315×10 ⁻⁴
SCB-3	10.69	120	12.87	60	0.21~1.91	7.558×10 ⁻⁴
SCB-4	-	9	17.20	-	-	-
SCB-5	15.25	120	7.80	20	1.12~4.17	-

길산천 상류쪽에 위치하는 SCB-5번공(기산면 산정리 소재)의 주요 대수층은 21.7~25.0 m 심도 구간의 부정합 혹은 풍화암으로서, 투수량계수는 1.12~4.17 m²/day의 범위를 보였다. 인근하는 SCB-4와 SCB-5 시추공 간에는 양수에 의한 수위영향이 전혀 관찰되지 않아, 저류계수를 구하지 못하였다. 길산천 중류 지점에 위치하는 SCB-2와 SCB-3 시추공(기산면 두북리 소재)의 주요 대수층은 24.5~27.5 m 심도 구간의 부정합 혹은 풍화암으로서, 투수량계수가 0.08~0.87 m²/day로서 매우 낮은 값을 보였다. 이곳에서 구한 저류계수는 7.558×10⁻⁴~8.315×10⁻⁴ 정도의 범위를 보였다.

시추공 SCB-1,6,7(화양면 장상리 소재)은 공간 거리 5~10.2 m 이내의 가까운 거리에 위치하면서 시추공 심도를 서로 달리하는 것들이다. 시추공 SCB-1에서의 주요 대수층은 32.5~45 m 심도 구간의 풍화토 혹은 풍화암으로서, 대수층의 투수량계수는 21.61~23.16 m²/day로 매우 높게 나타났다. 14.7~19.5 m 심도 구간의 모래 퇴적층을 대수층으로 하는 시추공 SCB-7의 투수량계수는 1.98~3.40 m²/day로서 시추공 SCB-1과는 매우 큰 차이를 보였다. 26.5~29.5 m 심도 구간의 모래 퇴적층을 대수층으로 하는 시추공 SCB-6에서는 수리상수를 구하지 못하였다. 그러나, 이 시추공에서는 양수 시 점토질 모래가 지하수와 함께 다량 토출되는 특성을 보여 SCB-1 및 SCB-7 시추공과는 대수층 특성이 매우 다를 수 있었다. 인근하는 SCB-1, 6 및 7 시추공들간에는 양수시 수위영향이 전혀 관찰되지 않았다. 즉, 이들 3개 공들은 양수시 수위 영향을 전혀 받지 않으며 수리적 특성도 매우 상이함을 보여, 심도를 달리하는 3개 대수층이 수리적으로 서로 단절되어 있음을 명확히 보였다.

4.3. 지하수의 수질 특성

시험시추공에 대한 양수시험시 간이수질을 측정하였으며(Table 3), 양수 초기 혹은 말기에 물 시료를 채

취하여 수리지화학분석을 실시하였다(Table 4).

간이수질 분석 결과, 길산천 하류 지점에 위치하는 3개공(SCB-1,6,7)의 pH는 6.23~7.05범위로서 3개 시추공 간에 유사함을 보였고, EC 값은 12,290~21,000 µS/cm 범위로서 매우 높은 값을 보였다. 그러나 DO 및 ORP는 3개 공들간에 서로 다른 값을 보여 환경의 차이를 보였다. 기산면 두북리에 위치하는 2개공(SCB-2,3)은 양수시험시 수위 영향이 있는 공들로서 대수층이 수리적으로 연결되어 있는 것으로 사료되었으나, 양자간의 EC, pH 값은 큰 차이를 보였다. 기산면 산정리에 위치하는 2개공(SCB-4,5)은 양수시험시 양자간에 수위 영향이 전혀 없는 공들로서 대수층이 수리적으로 단절되어 있을 것으로 추정되며, 양자간에 pH 값에서도 큰 차이를 보였다. 전반적으로, 풍화토 및 풍화암을 대수층으로 하는 SCB-1번공을 제외하면, 모두 ORP 값이 매우 낮은 상태에서 환원환경임을 지시해 주고 있다.

물 시료에 대한 이화학분석 결과는 Table 4와 같으며, 양이온 및 음이온 당량농도비는 Table 5 및 Fig. 5와 같다. 공간 거리 5~10.2 m 이내의 가까운 거리에 위치하면서 시추공 심도를 서로 달리하는 SCB-1,6,7번공들에 대하여는 양수시험 초기와 말기로 나누어 시료를 채취하여 시간의 흐름에 따른 수질 변화 양상을 검토해 보았다. 다른 시추공들에서는 모두 양수시험 말기에 시료를 채취하였다. EC가 4,390~21,000 µS/cm로 고염분 특성을 보이는 SCB-1,6,7번공들의 수질 유형은 모두 Na-Cl 형으로서 해수의 성분이 가깝다. SCB-2,3번공의 수질 유형은 Na-HCO₃ 혹은 Na(Ca)-HCO₃ 형, SCB-5번공의 수질 유형은 Ca(Na)-HCO₃ 형을 보여 시추공의 위치에 따라 남쪽에서 북쪽 지역으로 가면서 수질 유형이 Na-Cl 형에서 Na-HCO₃ 혹은 Na(Ca)-HCO₃ 형을 거쳐 Ca(Na)-HCO₃ 형으로 변화하는 양상을 보였다.

SCB-6번공의 경우 양수 초기의 수질로서, 수질 유형은 Na-Cl 형이긴 하나, HCO₃ 함량이 37.1%로서 다른

Na-Cl 형 지하수들(1.5~12.5%)에 비해 HCO₃ 함량이 매우 높게 나타났다. 이 양수 초기 시료에서의 EC 값도 4,390 μS/cm으로서 양수 말기의 12,290 μS/cm에 비해 현저히 낮게 나타났으며, 해수에서 많이 검출되는 Sr과 Br의 함량도 이 시료에서는 각각 0.5 mg/L,

4.1 mg/L로서 낮은 함량 특성을 보였다. 이러한 점들을 고려해 볼 때, SCB-6번공에서는 양수 초기에는 주변 담수(지표수 혹은 지하수)에 의한 혼합 현상이 있었으며 양수가 진행되면서 담수의 영향은 없어지고 퇴적층 내에 보존되어 있던 해수 성분의 특성을 점차 반영해

Table 3. In-situ water quality for test boreholes during pumping tests

시추공	EC(μ/cm)	pH	T(°C)	DO(mg/L)	ORP(mV)
SCB-1	21,000	6.23	16.0	1.05	57
SCB-6	12,290	7.05	15.3	0.03	-139
SCB-7	16,900	7.02	15.1	0.87	-74
SCB-2	1,675(464*)	12.0(11.0*)	(15.4*)	1.06(0.91*)	-104(-40*)
SCB-3	742	8.48	15.5	0.28	-139
SCB-4	638	11.0	-	0.78	-50
SCB-5	566	7.84	15.2	0.50	-127

Most water qualities were estimated at the latest stage of each pumping test except for SCB-2.

Asterisk(*) of SCB-2 sample means water quality estimated after the successive pumping(18 minutes), recovery(60 minutes) and finally surging(40 minutes) works.

Table 4. Chemical analyses of ground water samples for test boreholes

No.	EC (μS/cm)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Na (mg/L)	K (mg/L)	HCO ₃ (mg/L)	Cl (mg/L)	SO ₄ (mg/L)	Si (mg/L)	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)	Sr (mg/L)	Br (mg/L)	As (ppb)
SCB-1	20,300	765	484	2,820	8.1	211	7,074	48.7	21.8	3.8	45.5	12.6	34.7	12.2
SCB-1B	21,000	720	451	2,765	8.5	207	8,063	94.4	21.3	3.0	42.1	12.0	61.9	12.3
SCB-6	4,390	19.7	44.4	805	32.7	1,095	1,077	1.1	27.8	0.4	0.4	0.5	4.1	13.4
SCB-6B	12,290	510	372	2,065	46.4	604	5,589	46.8	23.9	18.1	17.9	10.9	19.5	11.2
SCB-7	15,440	100	273	2,615	71.5	1,312	5,280	63.7	13.1	0.8	2.4	2.1	20.8	12.6
SCB-7B	16,900	117	301	2,880	74.0	1,378	5,714	88.7	13.8	4.2	3.0	2.4	22.5	12.7
SCB-2B	464	32.9	2.8	46.8	6.6	138	28.8	28.0	13.0	0.1	0.1	0.4	0.2	13.6
SCB-3B	742	33.5	12.7	69.0	3.6	187	80.4	12.3	15.1	0.1	0.1	0.9	0.5	12.3
SCB-5B	566	33.8	11.7	29.5	5.3	168	97.6	5.3	16.3	0.3	0.1	1.2	0.5	11.3

B; samples collected during the latest stage of each pumping test others; samples collected at the incipient stage of each pumping test

Table 5. Ratios of cations and anions for ground water samples at the study area

Sample No.	Cation Ratio (epm %)			Anion Ratio (epm %)		
	Ca	Mg	Na+K	Cl(+NO ₃)	SO ₄	HCO ₃
SCB-1	19.0	19.8	61.2	97.8	0.5	1.7
SCB-1B	18.6	19.2	62.3	97.7	0.8	1.5
SCB-6	2.4	9.0	88.5	62.8	0.0	37.1
SCB-6B	17.3	20.8	61.9	93.6	0.6	5.9
SCB-7	3.5	15.7	80.8	86.7	0.8	12.5
SCB-7B	3.7	15.7	80.6	86.8	1.0	12.2
SCB-2B	40.3	5.7	54.1	22.1	16.3	61.6
SCB-3B	28.8	18.0	53.2	40.6	4.6	54.8
SCB-5B	41.5	23.7	34.9	49.0	2.0	49.1

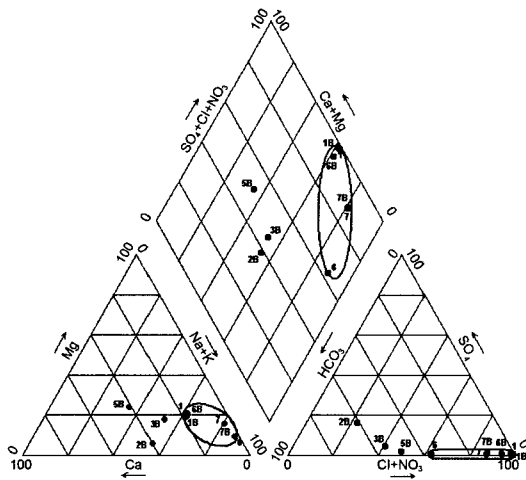


Fig. 5. Piper diagram for ground water quality at the study area.

가는 것으로 해석된다. EC 4,390 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 을 보이는 SCB-6 시료(초기 양수 시료)를 제외하면 SCB-1,6,7번 공들에서는 Sr 함량(2.1~12.6 mg/L)과 Br 함량(19.5~61.9 mg/L)이 매우 높게 나타나 해수의 수질 특성을 잘 반영하였다.

4.4. 물리화학적 요소의 시계열 관측 및 분석

Fig. 6에 표시된 길산천 하류지역에서 산출되는 고염분 지하수 대수층에서의 지하수위 변화이다. SCB-1 시추공의 지하수위는 점차적으로 하강하는 양상을 보이며, 3개 시험시추공 중 수위 변화 폭이 가장 크다. 이와 달리 SCB-6와 SCB-7의 지하수위 시계열은 점차적으로 하강하다가 특정 시점에서 상승하는 단순한 변화

양상을 보이며, 지하수위 변화 폭도 크지 않다. SCB-6의 경우, 관측 초기에서 지하수위가 부분적으로 상승했다가 하강하는 양상을 보여 SCB-7의 수위변화 변화 양상과 차이를 보인다.

3개 시험시추공에서의 전기전도도 변화 관측을 위한 CTD 설치 심도는 SCB-1, 6, 7번공에서 각각 지표하 50 m, 25 m, 17 m로서, 지하수위 변동에서 관찰되는 것과 마찬가지로 3개공 간에 서로 상이한 변화 양상과 전기전도도 값의 차이를 보여준다. SCB-1(16,850 $\mu\text{S}/\text{cm}$)과 SCB-6(10,670 $\mu\text{S}/\text{cm}$)는 관측기간 동안 거의 일정한 전기전도도 값을 보이는 반면에, SCB-7의 전기전도도는 관측 초기의 11,700 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 에서 출발하여 14,800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 까지 점진적으로 증가하다가 12,200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 으로 급락하는 변화 양상을 보여 각 시험시추공이 관통한 대수층들이 상이한 전기전도도 값과 변화 양상을 보인다. 이들 3개 시험시추공이 보여주는 전기전도도와 지하수위 변화 양상의 차이는 이들 3개 관측공 각각이 관통한 대수층들이 상호간 영향을 미치지 않음을 지지하며, 이는 양수시험중 시추공 상호간 수위변화를 일으키지 않는 것으로도 확인된다.

Fig. 7은 Fig. 6에 표시된 3개 시험시추공(SCB-1, 6, 7)에서 관측한 지하수위와 전기전도도 시계열에 대한 푸리에 변환 결과로서, 수위 및 전기전도도 변동에 내포된 장주기의 추세를 이동 평균(running average)을 이용하여 제거한 것이다. 주파수 분포가 저주파 영역에 우세한 양상을 보이기는 하나, 전반적으로 백색 잡음(white noise)에 가까운 주파수 분포를 보인다. 3개 시험시추공의 지하수위와 전기전도도 관측 자료의 스펙트럼에서는 조석과 관련된 변동 성분이 확인되지

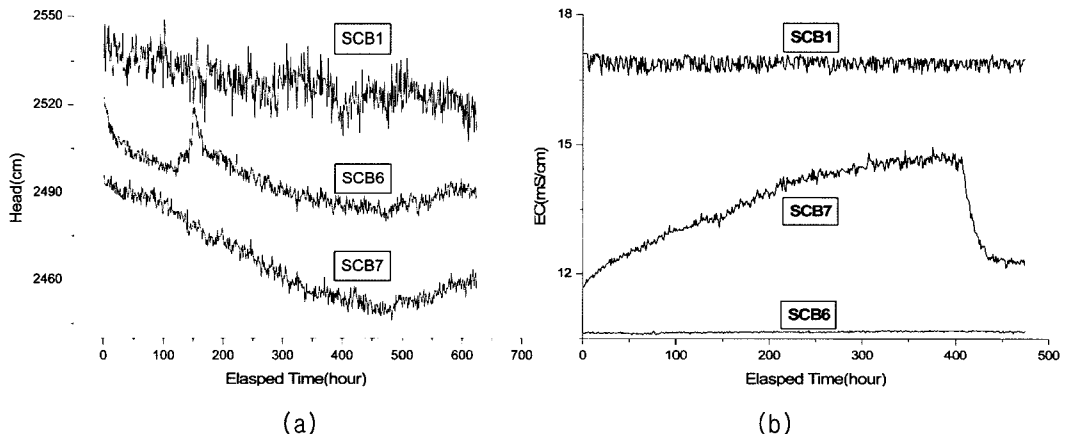


Fig. 6. Variations of (a) ground water level and (b) electrical conductivity at the lower reaches of Gilsan stream (Borehole Nos. SCB-1, 6 & 7).

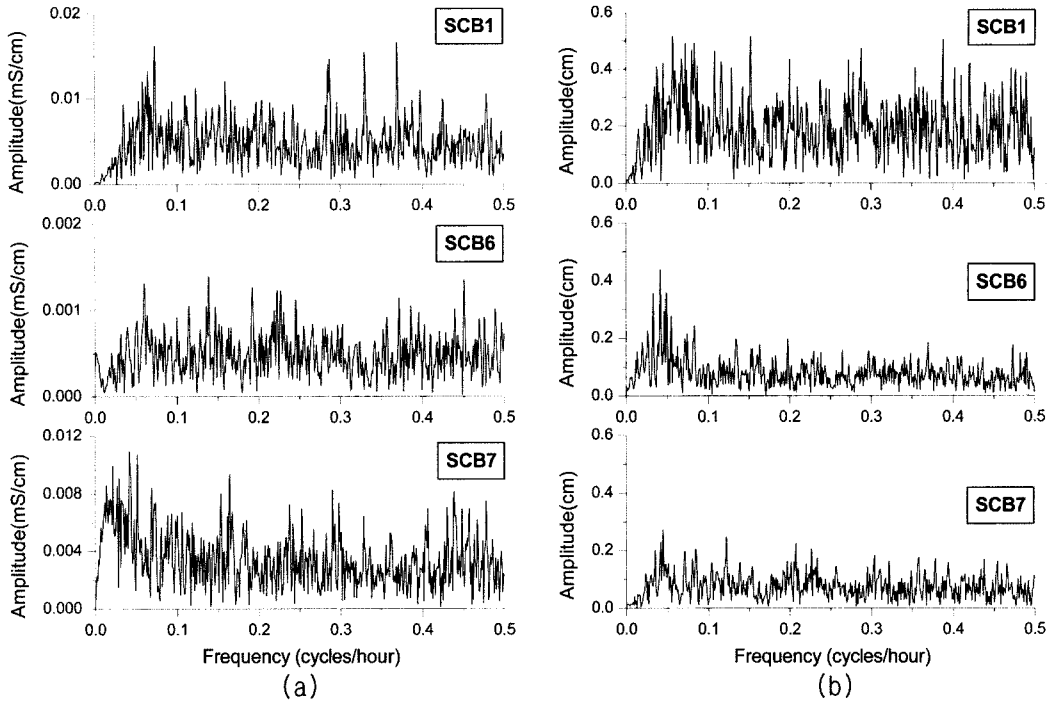


Fig. 7. Fourier transform results of the observed records for (a) ground water level and (b) electrical conductivity variations.

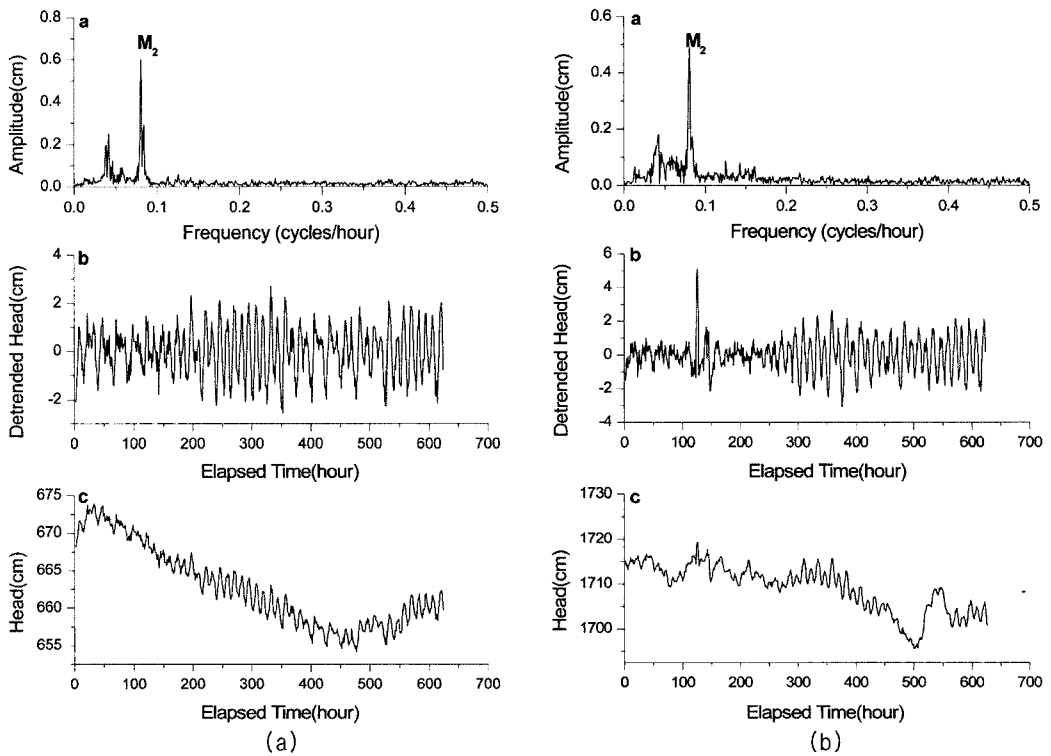


Fig. 8. Ground water level variations and their spectrum of (a) SCB-3 and (b) SCB-5 boreholes. a; Spectrum of water level variations, b; Water level variations after removal of trend, c; Observed water level variations.

않았다(Fig. 8).

반면에 길산천 중류 및 상류지역에 위치하는 SCB-3 및 SCB-5 시험시추공에서의 지하수위는 조석변동하고 있음이 시계열 스펙트럼분석에서 확인되었다. 지하수위 관측기간이 짧아 주요 조석 분조들이 명확하게 구분되지는 않았으나, 조석 고유의 분조 성분인 M_2 가 명확하게 인지된다(Fig. 8(a), 8(b)). 그러나, 이 지점에서 나타나는 지하수위 조석변동의 직접적인 원인이 지구조석의 결과인지 아니면 해양조석의 결과인지는 명확하지 않다. 연구지역의 수리 특성과 해안으로부터의 거리 등을 고려하면 해양조석의 영향에 의한 것으로 판단하기에는 무리가 따른다. 특히 시험시추공 인근을 지나는 길산천은 수문에 의해 하천수의 유출입을 제어하고 있어 지하수위 조석변동과는 무관한 것으로 보인다. 반면에 시험시추공의 심도가 너무 얕고(40 m), 시추공내 고각의 파쇄대가 확인되지 않아 지구조석의 영향으로 보기에 무리가 따른다. 이에 대하여는 추후 보다 충분한 자료 확보와 기초력 변화와의 비교 등을 통한 지하수위 조석변동의 원인 규명이 요구된다.

4.5. 고(高)염분 지하수의 기원

국내 서·남해안지역에서 산출되는 지하수 중 총용존염량(TDS)이나 Cl 함량이 높은 것들은 주로 해수침투의 직접적인 영향에 의한 결과로 해석되어 왔다. 특히, Lee *et al.*(2001, 2004)는 해수침투 영향의 직접적인 근거로서 지하수위 변동, 전기전도도 변화 등의 주기적인 변동성을 중시하였으며 지하수 수질이 해수 성분에 가깝고 지하수위 및 전기전도도의 변동 주기성이 해양조석과 관련이 있는 경우에는, 주기성 분석이 해수유입에 의한 1차적인 판단 근거로 활용될 수 있음을 논의하였다. 따라서, 해안가에서 총용존염량(TDS)이나 Cl 함량이 높은 지하수 대수층이 해수침투에 의해 직접적으로 영향을 받는지를 확인하기 위해서는 지하수위 및 전기전도도에 대한 시계열 관측 및 주기 성분 분석이 필요하다.

해수침투 이외에도 세계적으로 지하수 염분화의 원인은 퇴적기원의 고(古)염분 지하수(fossil saline water within sediments; Akouvi *et al.*, 2008), 암염 용해(halite dissolution; Freeman, 2007), 농업 유출수(agricultural effluents), 제설용 소금(road salt) 등 다양하게 알려져 있으나, 지금까지 국내 서남해안지대에서 지하수의 염분화 현상은 증적층이든 암반이든 담수 대수층으로의 해수침입이라는 동적인 현상으로만 해석해 온 경향이 있다. 국내 해안지역의 지질 및 환경을

고려해 볼 때, 원래 퇴적기원의 고(古)염분 지하수 혹은 조간대 해안 매립지에서 포켓상으로 고립 형성된 염지하수가 존재할 가능성이 많으며, 이에 대한 모델 제시가 필요하다.

금번 연구지역인 금강하구둑 부근 길산천 유역 내 지하수 중 전기전도도 값은 $10,000 \mu\text{S}/\text{cm}$ 이상의 고(高)염분 지하수로서 이에 대하여 지하수 수질 및 산출 특성을 기술하였고, 시추조사, 대수층 특성 시험 및 수위/수질의 시계열 자료 분석 등을 통하여 고(高)염분 지하수의 기원 및 해수침투와의 연관성 여부 등을 검토하였다. 시험시추공에 대한 코어 로깅, 양수시험, 수질 분석 등을 종합하여 볼 때 이 지역에는 4개 정도의 대수층이 발달한 것으로 파악되었다. 지표 가까이(4.1~7.3 m 심도 구간)의 실트질 모래층을 제외하고 고(高)염분 지하수는 3개 주요 대수층(Fig. 3의 A,B,C 대수층)에서 산출됨이 확인되었다. 3개 대수층 중 14.2~20.0 m 심도 구간의 조립질 및 세립질 모래층은 대수층 A, 25.0~30.0 m 심도 구간의 조립질 및 실트질 모래층은 대수층 B, 32.5~45.0 m 심도 구간의 풍화토(부정합?) 및 풍화암은 대수층 C로 분류하였으며, 다음과 같은 특징들을 보였다.

- ① 양수시험 중 시추공 상호간에 수위 영향이 전혀 없다.
- ② 대수층 C와 대수층 A 양자간에는 투수량계수가 최대 10배 정도의 큰 차이를 보이며, 투수량계수를 구하지 못한 대수층 B는 양수시 실트질 점토가 다량 토출되어 대수층 A 및 대수층 C와는 전혀 다른 특성을 보인다.
- ③ 자동수위 계측 결과, 대수층 B와 대수층 C의 지하수위는 점차적으로 하강하다가 특정 시점에서 상승하는 단순한 변화 양상을 보이나, 대수층 C의 경우에는 전체적으로 불규칙한 변화 양상을 보여 상호간에 수위 변동의 독립성을 보인다.
- ④ 전기전도도 변화 관측 결과, 대수층 C($16,850 \text{ uS}/\text{cm}$)와 대수층 B($10,670 \text{ uS}/\text{cm}$)는 관측기간 동안 거의 일정한 전기전도도 값을 보이는 반면에, 대수층 A의 전기전도도는 관측 초기의 $11,700 \text{ uS}/\text{cm}$ 에서 출발하여 $14,800 \text{ uS}/\text{cm}$ 까지 점진적으로 증가하다가 $12,200 \text{ uS}/\text{cm}$ 으로 급락하는 변화 양상을 보여 전기전도도의 변화 양상이 전혀 다르게 나타난다.
- ⑤ 스펙트럼 분석 결과, 3개 대수층에서의 수위 변동 및 전기전도도 변동 양상은 조석 변동과는 무관한 현상을 보였다.

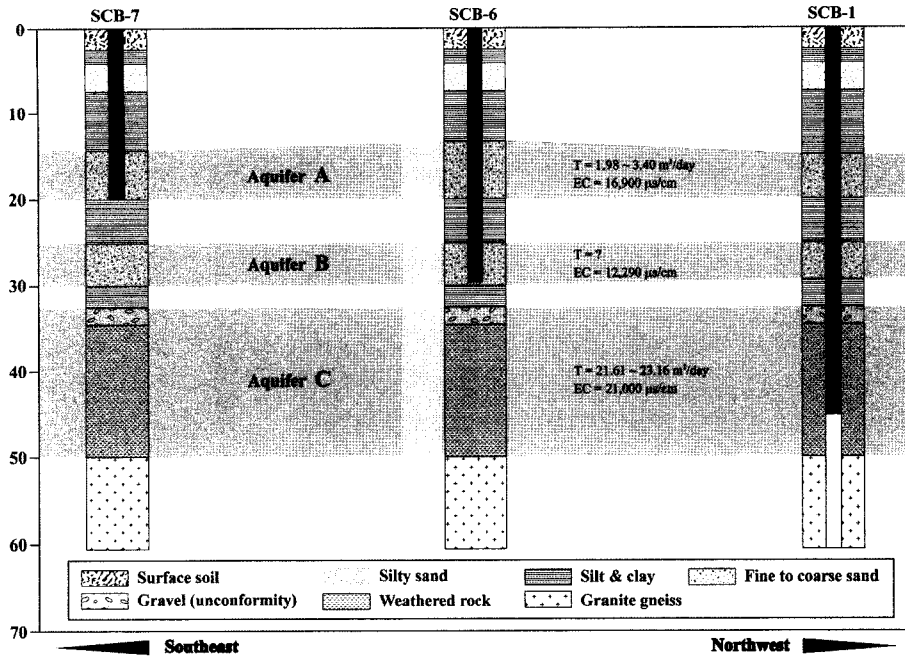


Fig. 9. Characteristic features of underground geology and three major aquifers with high-saline water quality at the lower reaches of Gilsan stream.

이러한 특징들을 종합해 볼 때, A, B, C 3개 대수층은 수리지질 및 수리지화학적으로 서로 단절되어 있으며 독립적인 수위 및 전기전도도 변동 양상을 보였다. 금번 연구지역인 금강하구둑 부근 길산천 유역내에서 산출되는 고(高)염분 지하수의 수질유형은 Na-Cl 형이고, 전기전도도 12,000~21,000 µS/cm, Sr 함량 2.1~12.6 mg/L, Br 함량 19.5~61.9 mg/L로서 그 함량이 매우 높고 기타 용존 성분들의 함량 또한 해수 성분에 가깝다. 또한, 이들 대수층의 산출 위치도 해안에서 매우 가까운 지점이므로 해수에 의한 직접적인 영향을 받고 있을 가능성이 농후한 상황이다. 그러나, 시추 조사 및 양수시험 결과, 연구지역내 고(高)염분 지하수 대수층은 실트질 퇴적물에 의해 서로 고립되어 있는 모래 퇴적물 또는 풍화대 상부(혹은 그 상위의 부정합)로 구성되어 있으며, 과거 지질시대의 조간대 환경에서 해수 성분의 물이 퇴적물내 혹은 풍화대내 공극 속에 포획되었다가 후에 퇴적된 실트질 퇴적물들에 의해 고립된 상태로 유지되었을 가능성이 많다. 금번 연구 결과, 이들의 지하수위 및 전기전도도 변동 시계열의 스펙트럼에서는 해양조석 성분이 전혀 관찰되지 않았다. 따라서, 이들 대수층이 갖고 있는 지하수의 고(高)염분 특성은 현재 해수 침투에 의해 역동적으로 영향을 받은 결과로 볼 수 없으며, 대수층의 산출 특성

을 고려해 볼 때 오히려 퇴적층 및 풍화대 내에 이미 존재하였던 고(古)염분 성분의 영향인 것으로 해석되어야 한다. 이러한 고염분 지하수는 내륙쪽의 길산천 중·상류지역에서는 지표수 혹은 담수 지하수의 혼합에 의해서 부분적으로 용존 함량이 줄어들고 수질 특성이 변하여, 전기전도도도 464~742 µS/cm로 줄어들고 수질 유형도 Na-HCO₃ 혹은 Na(Ca)-HCO₃ 형을 거쳐 Ca(Na)-HCO₃ 형으로 점변하는 양상을 보이는 것으로 해석된다.

5. 결 론

충남 서천군 금강하구둑 부근의 길산천 하류지역에서 산출되는 고염분 지하수의 산출 특성, 수질 특성 및 고(高)염분의 기원에 대하여 고찰하였으며, 연구 결과는 다음과 같다.

(1) 길산천 유역내 지하수 수질 유형은 하류지역의 Na-Cl형에서, 중류지역의 Na-HCO₃형 혹은 Na(Ca)-HCO₃형을 거쳐, 상류지역의 Ca(Na)-HCO₃형으로 점차 변화하는 양상을 보인다. 지하수 내 전기전도도(EC)도 길산천 하류지역(12,000~21,000 µS/cm)에서 중상류지역(464~742 µS/cm)으로 가면서 점차 낮아지는 변화 양상을 보인다. 이러한 변화 양상은 고(高)염분 지하수

와 담수 지하수와의 혼합작용에 의한 것으로 여겨진다.

(2) 고(高)염분 지하수는 길산천 하류지역에서만 산출되며, 대수층은 14.2~20.0 m 심도 구간의 조립질 및 세립질 모래층, 25.0~30.0 m 심도 구간의 조립질 및 실트질 모래층, 32.5~45.0 m 심도 구간의 풍화토(혹은 부정합) 및 풍화암으로 구성되어 있다.

(3) 길산천 하류지역의 고(高)염분 지하수 내 전기전도도 값은 SCB-6번 시험공에서 양수 초기에 4,390 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 을 잠시 보인 것을 제외하면 모두 12,000~21,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 매우 높고, Sr과 Br 함량 역시 각각 2.1~12.6 mg/L, 19.5~61.9 mg/L로서 매우 높게 나타나, 해수의 수질 특성을 잘 반영한다.

(4) 양수시험 결과, 길산천 하류지역의 고(高)염분 지하수 대수층은 서로 수리지질학적 및 수리지화학적으로 단절되어 있는 산출 특성을 보인다.

(5) 수위 변동 및 전기전도도 변화에 대한 시계열 관측 및 분석 결과, 고(高)염분 지하수의 3개 대수층은 서로 독립적인 변동 양상을 보였으며, 스펙트럼에서는 조석과 관련된 변동 성분이 확인되지 않았다.

(6) 길산천 하류지역에서 산출되는 고(高)염분 지하수($\text{EC}=12,000\sim 21,000 \mu\text{S}/\text{cm}$)의 기원은 현재 진행되는 해수침투 현상에 의한 것이 아니라, 과거 퇴적물에 잔존해 있었거나 과거에 해수침투의 영향으로 남아있던 고(古)염분 지하수(fossil saline water)에 의해 기인되는 것으로 해석된다.

사 사

본 연구 논문은 지식경제부에서 지원된 한국지질자원연구원 기본연구사업 “지구환경변화 대응 지하수확보 통합 솔루션 개발(계정번호 09-3414)”에 의해 수행되었습니다. 원고의 심사과정에서 세심한 수정과 지적을 해주신 김강주 교수님과 황세호 박사님, 그리고 도면 제작에 도움을 준 박기훈에게 감사의 마음을 표합니다.

참고문헌

- Akouvi, A., Dray, M., Violette, S., Marsily, G. de and Zuppi, G. M. (2008) The sedimentary coastal basin of Togo: example of a multilayered aquifer still influenced by a palaeo-seawater intrusion. *Hydrogeology Journal*, v. 16, p. 419-436.
- Chi, S. J., Chang, H. W., Kim, N. H., Kim, T. G., Yun, W. (2003) Water quality and stable isotope study for the brackish groundwater at Yeongkwang coastal area. *Proceedings of Spring Academic Meeting for Presentation of the Korea Society of Economic and Environmental Geology*, 103-107p.
- Freeman, J. T. (2007) The use of bromide and chloride mass ratios to differentiate salt-dissolution and formation brines in shallow groundwaters of the Western Canadian Sedimentary Basin. *Hydrogeology Journal*, v. 15, p. 1377-1385.
- Freeze, R. A. and Cherry, J. A. (1979) *Groundwater*. Prentice Hall.
- Hwang, S. H., Park, G. K., Shin, J. H., Lee, S. H., Kim, G. Y., Park, I. H., Lee, C. W., Yum, B. W., Sung, N. H. and Shim, B. W. (2005) Mitigation of Seawater Intrusion Problems. MOST, OAA2004031-2005(2), 121p.
- Lee, B.J., Moon, S.H., Cho, B.W., Sung, I.H., and Lee, C.W. (2001) Identification of influences on groundwater fluctuations using spectrum analysis. *Journal of Geological Society of Korea*, v. 37, No. 2, p. 287-296.
- Lee, B.J., Cho, B.W., Moon, S.H. and Lim, M.T. (2001) Seawater encroachment into bedrock aquifer in Dongnae, Pusan. *Journal of the Geological Society of Korea*, v. 37, No. 3, p. 407-420.
- Lee, B.J., Koh, K.W., Moon, S.H., Park, Y.S. and Lim, M.T. (2004) Identification of seawater encroachment based on the characteristics of tidal fluctuation of groundwater level. *Journal of the Geological Society of Korea*, v. 40, No. 1, p. 53-64.
- Lee, B.J. and Moon, S.H. (2008) Integrated approach for evaluating the characteristics of seawater intrusion using factor analysis and time series analysis: Seocheon-Gunsan area. *Journal of the Geological Society of Korea*, vol. 44, No. 2, p. 219-232.
- Lee, B.J. and Hwang, S.H. (2008) Evaluation of characteristics of seawater intrusion based on the groundwater fluctuations: Baksu area, Yeonggwang-gun. *Journal of the Geological Society of Korea*, vol. 44, No. 2, p. 233-240.
- Lee, S.G., Kim, S.J., Kim, Y.W., Kim, I.G., Kim, T.G., Kim, H.T., Park, I.H., Shin, J.H., Shin, H.M., Lee, M.J., Lee, W.S., Lee, T.S., Chi, S.J., Jin, J.H., Huh, D.G., Hwang, S.H., Hwang, I.G., Hwang, H.S. (2003) Development of the techniques for assessment, prediction and prevention of seawater intrusion. MOST, 00-J-ND-01-B-14, 233p.
- MAF(Ministry of Agriculture and Forestry), Korea Rural Community and Agricultural Corporation (2006) Report for Saltwater Intrusion Monitoring Network.
- MOCT(Ministry of Construction and Transportation), KOWACO(Korea Water Resources Development Corporation, KIGAM(Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources) (2003) Basic Groundwater Survey Report for Seocheon-Gunsan Area, 267p.
- Park, K.G. (2008) Personal communication.
- Park, S.C., Yun, S.T., Chae, G.T. and Lee, S.K. (2002) Hydrogeochemistry of shallow groundwaters in western coastal area of Korea: a study on seawater mixing in coastal aquifers. *Journal of KoSSGE*, v.7, p.63-77.
- Smith, S. W. (1997) *The scientist and engineer's guide to digital signal processing*. California technical publishing, San Diego, California, 98p.