

지하철 건설공사에 따른 수변 구하도지역의 지하수위 이상변동 현상 사례연구

채수용 · 이성호 · 박대희 · 이영동 · 원경식[‡]

지오택컨설턴트(주)

요 약

도심지역을 비롯한 대다수의 국내 하천은 구획정비와 하천범람 예방 등의 목적으로 곡류하천의 직강화 및 수변지역의 매립공사가 빈번하게 이루어져 왔다. 그러나 하천정비 및 매립을 통해 발생한 구하도와 주변 수변 충적층의 지하수 흐름은 대수층의 과거 퇴적환경에 지속적인 영향을 받고 있다. 본 연구는 대전광역시 유등천의 구하도 수변 충적층의 지하철 공사 중 발생한 지하수 이상변동 현상에 따른 원인을 현장시험 및 고지형 분석을 통해 해석하고 지하수 모델링을 활용하여 연구지역 지하수 변동의 인위적인 요인에 대한 원인규명과 대책방안 제시과정을 기술하였다. 본 연구는 수변지역의 개발에 있어 구하도의 분포와 수리적 특성이 미치는 영향에 대하여 현장사례를 통해 기술함으로써, 구하도 특성 분석이 수변지역 개발에 중요한 분석 요소임을 설명하고자 한다.

주요어: 구하도, 지하수, 고지형, 퇴적환경, 수변지역

Sooyong Chae, Sungho Lee, Daehee Park, Young-Dong Lee and Kyoung-Sik Won, 2016, Case study on abnormal groundwater table variations in the abandoned channel area during subway construction. Journal of the Geological Society of Korea. v. 52, no. 3, p. 247-258

ABSTRACT: The majority of domestic streams and rivers including the urban areas have frequently been subjected to the river maintenances including channel straightening and reclamation for the purposes of flood prevention and river compartment area. However, groundwater flow in the riparian areas has been influenced by the depositional environment of the aquifer and abandoned channels. In Daejeon, the abnormal fluctuation of groundwater levels was identified during the subway construction crossing the Yudeung-cheon. This study analyzed the cause of the abnormal event through field hydraulic tests and paleotopographic analysis, and utilized the groundwater modeling to study the cause and suggest the technical measures. The study results indicate that the distribution of abandoned channels affects continuously the present groundwater distribution and flow system. Thus this study is to suggest the analysis of paleotopography and abandoned channels are the important investigation items for groundwater development in the riparian area.

Key words: abandoned channel, groundwater, paleotopography, depositional environment, riparian area

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

1. 서 론

국내 하천의 효율적인 보전·관리를 위하여 1970년대 이후 도심지역을 비롯한 전국의 크고 작은 하천에 단계적인 하천정비 사업이 진행되었다. 초기 하천정비 사업은 국토이용관리의 효율성 증대를 위한 곡류하천의 하도 정비 및 홍수 시 하천범람 예방

을 위한 제방축조를 기본으로 시작하여 현재는 하천수의 수질관리, 자연친화적 하천환경조성, 수자원 확보 등에 이르는 다양한 하천관리 사업이 진행 중이다. 상기 사업을 통한 유로흐름 개선사업은 도시 구획(division) 및 경지정리(land consolidation)에 효율적 개발을 촉진하였으며, 유수의 흐름을 직선화하여 홍수 시 하천범람의 위험성을 낮추는 효과를 가

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



Fig. 1. (a) Regional of (b) site maps of the study area.

저왔다. 이에 오늘날의 국내 하천은 우수-하천의 자연적인 흐름으로 형성된 사실상 자연곡류 형상을 유지하고 있는 하천을 찾아보기 어려운 실정이다. 그러나 하도 정비로 인한 하천흐름의 직강화(channel straightening)는 하천 및 지류 등의 배수체계(drainage system)에 국한하여 시행되어 구하도(abandoned channel)를 통한 지하류(underground runoff)의 자연적 흐름은 지속되고 있으며, 수변지하수 형성에 주요한 공급/배출 원인요소이다. 강수(rain water)의 증발량을 제외한 강우량중 약 87% 이상이 지하수 또는 지하류로 일시적으로 공급되어 하천에 재유입됨(Won et al., 1989)을 고려할 때, 수변지역의 수자원 확보 및 하상 인공구조물 설치사업에서 고지형의 분석을 통한 구하도 지하수의 분포 및 흐름특성 분석이 설계/개발에서 충분히 검토되어야 한다. 이렇듯 하천과 수변지역의 퇴적환경을 고려한 지하수 시스템 연계 연구는 소규모 퇴적분지 내에서 지하수의 국지적 및 광역적 흐름 유형에 대한 연구(Tóth, 1963), 충적분지의 형태와 지하수 수문의 관계에 대한 연구(Larkin and Sharp Jr., 1992) 등의 연구를 비롯해서 국내에서도 지하수하상의 인공구조물(보) 설치에 의한 하천수-지하수 시스템의 변화에 따른 수위/유량 변화와 주요 이온농도의 변화에 대한 연구(Oh et al., 2007) 및 퇴적환경, 하천수위 및 지하수 양수에 따른 수변지역 천부 지하수의 수위와 수질변동(Cha et al., 2015) 등의 연구가 선행되었다.

본 연구는 대전광역시에 위치한 유등천을 가로지르는 도시지하철 공사 중(그림 1)에 발생한 유등천 수변지역의 지하수위 이상 변동현상을 수리지질학



Fig. 2. Geographic view of the study area.

적으로 분석하여 상기 현상의 구하도 지하수 흐름영향을 현장시험으로 확인하였다. 또한 이들 현상을 지하수 유동 모델링을 통하여 대책방안을 제시한 사례를 통해 연구지역 하천수-지하수 상호 흐름특성을 설명하고자 한다.

2. 연구지역의 지형 및 지질특성

연구지역은 대전광역시 서구 용문동에 위치한 유등천 수변지역(riparian area)으로써 연구지역 산계는 광역적으로 서측에는 해발 469 m의 갑하산, 남측으로는 해발 457 m의 보문산과 597 m의 식장산, 동측과 북측은 매봉산(해발 319 m)과 계족산(424 m) 및 금병산(365 m)으로 둘러싸인 지형적 분지에 위치하고 분지 내에 도솔산, 남선봉을 비롯한 소규모 구릉이 국부적으로 분포하고 있다(그림 2). 수계는 광역적으로 충청남도 금산군에서 발원한 지방 2급 하천인 유등천이 북쪽으로 흐르면서 대전광역시 중

구의 경계지점에서 국가하천으로 바뀌어 도심을 가로질러 대전천과 합류하여 갑천 본류로 유입되며 연구지역은 유등천 본류로부터 약 300 m 북서방향에 위치한 수변지역에 위치한다.

연구지역 지질특성은 크게 분지의 북서부에 분포하는 선캄브리아기 편마암과 남동부에 분포하는 고생대 옥천계 변성퇴적암류와 이들을 관입한 중생대 쥬라기의 화강암류가 기저에 분포한다. 변성퇴적암류는 일반적으로 이 지역에서 해발고도 500 m 이상

의 비교적 높은 산지를 이루고 있으며, 신생대 제4기의 층적층은 상기 암종들을 부정합으로 피복하고 있다. 정밀조사 결과, 조사지역의 기저 기반암은 복운모 화강암으로 중립내지 세립질의 회색 ~ 담회색을 띠고 있으며, 암석의 구성성분은 석영과 사장석 및 흑운모로 주로 구성된다(그림 3).

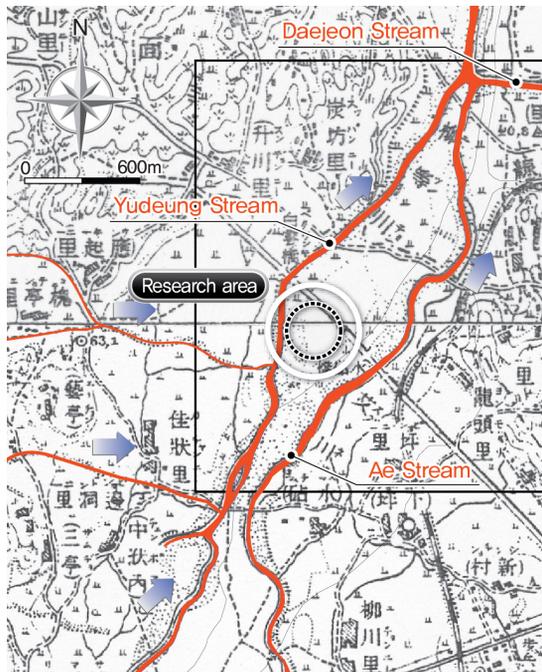
연구 대상지층인 유등천 수변지역의 층적층은 제 4기에 형성된 지층으로 실트와 모래자갈이 주를 이루며, 본류로부터 이격됨에 따라 실트와 세립모래 성분이 우세하게 분포한다. 연구지역은 현재 이러한 수변 층적층 상부에 매립을 통해 도심이 형성되었으며 1.0 m 내외의 매립층이 최상부를 피복하고 있다.

3. 고지형 분석을 통한 구하도 분포특성

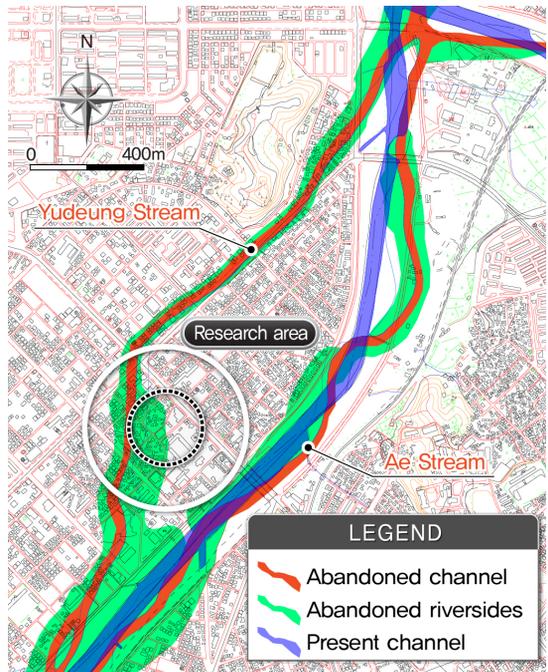
연구지역 일대는 과거 유등천의 본류와 지류를 사이에 두고 중앙에 형성된 층적지형으로써 하천 주변의 하상퇴적층이 폭넓게 분포하고 있다. 고지형 분석에 활용된 지형도는 일제강점기인 1919년에 발행된 대전 도폭으로 유등천과 애천으로 표기된 두 개의 하도가 연구지역 좌우로 흐르고 있다(그림 4a).



Fig. 3. Geological map of the study area. The geologic map is modified from Lee, et al. (1980).



(a)



(b)

Fig. 4. (a) Old and (b) present topographic maps of the study area.

유등천은 과거 동국여지승람 제17권에 유포천(柳浦川, Yupo stream)으로 기록된 바 있으며, 일제강점기 중에 애천(Ae stream)으로 표기된 바 있다. 이후 1970년대 도시개발의 확대로 연구지역 북서방향에 위치한 유등천은 하천정비 사업을 통해 하천복개와 하도 직강화가 이루어졌고 애천의 경우는 하도 정비 및 직강화 공사만 이루어져 현재의 유등천 형태를 유지하게 되었다. 또한 그림 4a를 보면 서측에서 유등천으로 유입되는 지류 역시 1980년대 구획정비 및 소하천 복개로 괴정동과 내동 등지에 지류의 흔적을 찾아보기 어렵다. 연구지역 구하도와 현재 하도의 분포현황은 그림 4b와 같다.

4. 연구 방법

연구지역의 하상퇴적층 분포범위와 지층별 구성

성분 분석을 위하여 연구지역 지하철 공사 중 지질 조사 시추자료를 활용하였으며(그림 5a), 충적층의 수리적 특성평가를 위해 그림 5b 위치와 같이 직경 20 cm 양수정(PW-1)과 15 cm 관측정(OW-1, -2, -3)을 지표 하 10 m 깊이로 설치하여 양수시험을 실시하였다. 양수시험 시 암반층을 통한 지하수유입 및 지표수유입 방지를 위하여 충적층 상부와 하부에 무공관을 설치하여 암반 지하수와 지표수의 유입을 차단하였다. 양수시험은 양수정을 이용한 단계양수시험 실시 후 전구간 양수시험과 각 관측공 별 단일공 양수시험을 추가적으로 수행하였으며, 채수량(pumping rate)은 10 ~ 20 m³/day로 72시간 실시하였다(그림 5c). 또한 관측공 OW-1호공과 OW-3호공에 지하수 유향유속시험을 실시하여 충적층의 지하수 흐름을 관측하였으며 심도 1 m 간격으로 측정하여 심도에 따른 대수층의 흐름유형을 확인하였다(그림 5d).

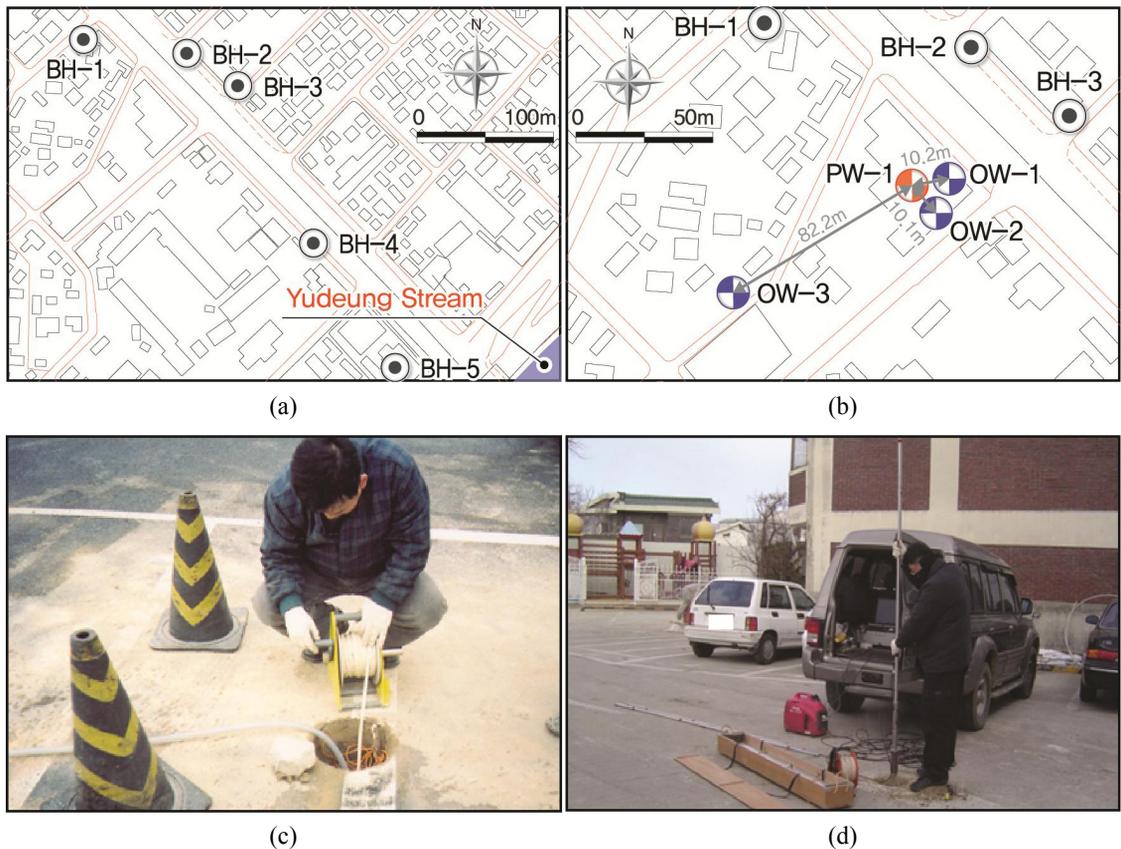


Fig. 5. Location of (a) investigation and (b) pumping test wells. Field activity photos of (c) measurement of groundwater level and (d) measurement of flow direction and rate.

5. 연구 결과

5.1 연구지역 퇴적환경과 수리특성

연구지역의 시추조사 분석결과, 대상지역은 지표 하 6 ~ 8 m 내외로 충적층이 분포하며, 실트와 모래가 혼재하는 범람원 퇴적층과 모래와 자갈이 혼재하는 하상력층(channel gravel)이 협재된 양상을 나타내

었다. 충적층의 주를 이루는 실트와 모래는 표준관 입시험(standard penetration test) 결과, 도심지 매립과 다짐현상에 의해 N값 30/30 ~ 50/20의 조밀 ~ 매우 조밀한 상태를 보인다. 모래자갈층은 실트질 모래 내에 국부적으로 협재되어 나타나며, 직경 30 ~ 70 mm 내외의 잔자갈과 왕자갈이 측정 조사 중 확인되었다. 또한 충적층의 두께는 4 ~ 6 m 내외로 충

Table 1. Results of drilling investigation in the study site.

Investigation wells	Stratigraphic thickness (m)				Groundwater level (GL. -m)	
	Buried layer	Alluvial layer		Alluvial thickness		
		Silty sand	Sandy gravel			
Percussion drilling	PW-1	1.2	unconfirmed	unconfirmed	6.5	4.02
	OW-1	1.5	unconfirmed	unconfirmed	6.3	4.04
	OW-2	1.2	unconfirmed	unconfirmed	6.0	4.06
	OW-3	1.0	unconfirmed	unconfirmed	5.0	3.77
Rotary drilling	BH-1	1.3	2.9	1.6	4.5	3.7
	BH-2	2.0	2.8	1.0	3.8	5.5
	BH-3	1.5	-	4.0	4.0	5.9
	BH-4	2.0	4.0	-	4.0	4.5
	BH-5	3.8	-	4.5	4.5	4.3

Table 2. Results of pumping test.

Well number	Initial ground water level (GL.-m)	Pumping rate (m ³ /day)	Drawdown water level (m)	Hydraulic conductivity (m/sec)	Storage coefficient
PW-1 (Pumping well)	4.02	10.5	2.73	3.76×10^{-6}	0.1482
OW-1 (Observation well)	4.04	10.0	2.88	6.50×10^{-6}	0.1196
OW-2 (Observation well)	4.06	10.0	3.72	3.02×10^{-6}	0.1793
OW-3 (Observation well)	3.77	20.0	3.05	3.51×10^{-6}	0.0297

Table 3. Groundwater flow directions and rates in the study area.

Experiment wells	Initial groundwater level (GL.-m)	Test depth (GL.-m)	Flow direction (°)	Flow rate (cm/day)
OW-1	4.04	5.0	inaccessible	inaccessible
		6.0	41.3	1.73
		7.0	58.0	6.91
		8.0	94.8	10.37
OW-3	3.77	4.0	49.92	1.73
		5.0	78.0	3.46
		6.0	67.9	3.46

적층 상부 표층은 1 ~ 1.5 m 두께의 매립층과 포장층이, 층적층 하부는 화강암 기원의 풍화대가 분포한다. 따라서 연구지역은 하천 층적층으로 유등천의

하천 퇴적층(fluvial deposit)과 범람원(floodplain) 퇴적층으로 구성되어있다. 지하수위는 갈수기인 2005년 11월 GL. -4 m 내외의 수위분포를 나타내었다(표 1).

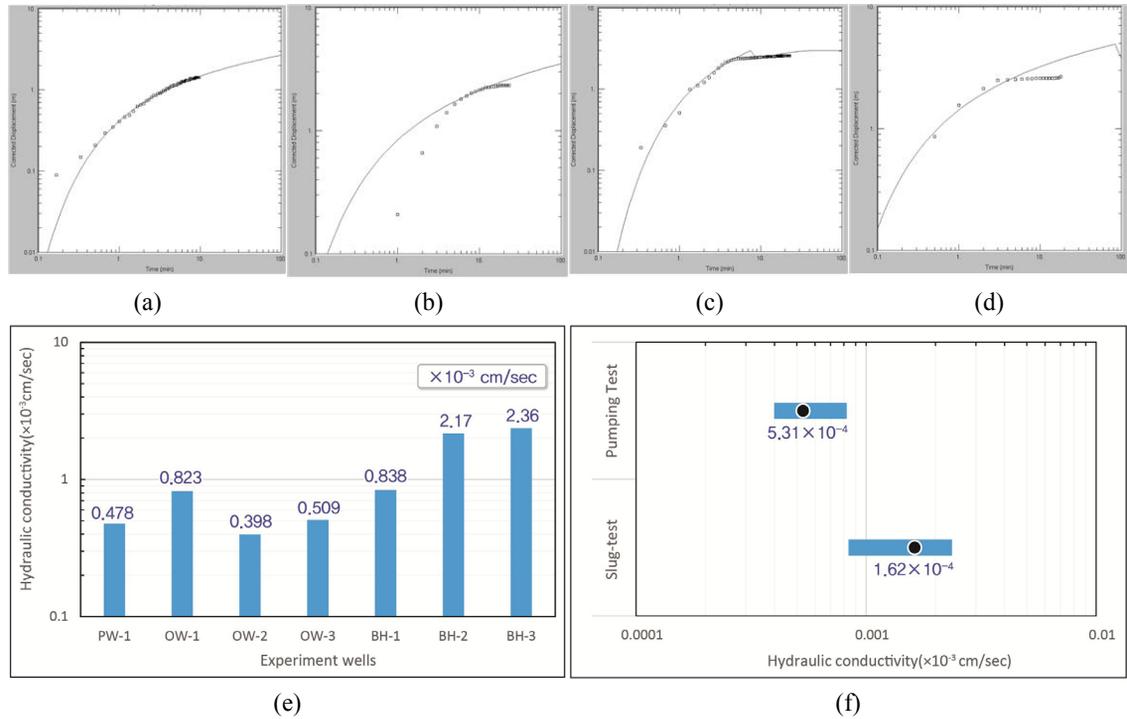


Fig. 6. Temporal changes in groundwater level of (a) PW-1, (b) OW-1, (c) OW-2 and (d) OW-3 through recovery test. (e) Hydraulic conductivity in the experiment wells. (f) Box plot of hydraulic conductivities in hydraulic test methods.

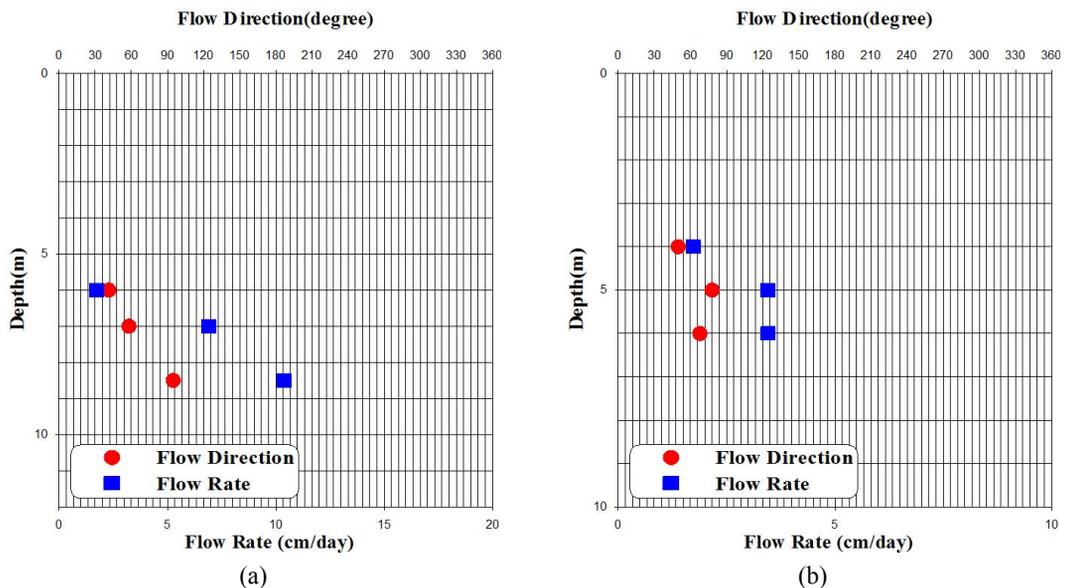


Fig. 7. Results of flow direction and rate measurement of (a) OW-1 and (b) OW-3.

양수시험에 의한 층적층의 수리특성 분석결과, 연구 지역 층적층의 수리전도도(hydraulic conductivity)는 $3.02 \times 10^{-6} \sim 6.5 \times 10^{-6}$ m/sec (그림 6e)로 나타나 실트 섞인 사질층의 일반적인 투수성을 보이며, 시추 조사 당시 이루어진 순간충격시험(slug-test) 결과에 비해 다소 낮은 투수성을 나타내었다(표 2; 그림 6e). 이는 양수시험의 시험구간이 실트와 모래가 주로 분포하는 층적층 전 구간을 대상으로 시험을 실시한 반면, 순간충격시험은 굴진 중 모래와 자갈층이 확인된 지점을 대상으로 해당지층에 국한하여 시험을 실시한 결과로 해석된다(표 2; 그림 6f).

연구지역 층적층의 지하수 흐름은 표 3과 같이 $41.3 \sim 94.8^\circ$ (NE ~ E방향)분포로 층적층의 천부는 NE 방향이 우세하며 심부로 진행함에 따라 E방향의 흐름이 우세하게 나타났다.(그림 7; 표 3). 지하수 유속은 $1.73 \times 10^{-2} \sim 10.37 \times 10^{-2}$ m/day로 심도 증가에 따라 유속이 증가하는 양상을 나타낸다. OW-1의 5 m 지점

시험 결과는 케이싱의 무공부 영향에 따른 1×10^{-7} m/sec 이하의 지하수의 미세흐름으로 인한 계층장비의 측정범위를 벗어났다.

5.2 연구지역 지하수위 이상변동 현황 및 원인분석

연구지역 지하수위는 유등천을 교차하는 도시철도 공사현장을 중심으로 2005년 7 ~ 8월, 지하철 노선의 NE방향(zone-1)은 설계수위에 비해 1 m 가량 지하수위가 낮아지는 현상이 나타났으며 SW방향(zone-2)은 평년수위에 비해 약 1.5 m 상승하는 현상이 발생하였다(그림 8a). 이러한 지하수위 이상 증감현상은 2004년 6월부터 2005년 풍수기에 걸쳐 점진적으로 진행된 것으로 확인되었으며, 수위상승에 따른 민원발생이 접수된 2005년 7월 이후 해당지역에 관측정을 설치하여 지하수위 관측이 실시되었다(그림 8b). 또한 2004 ~ 2005년 공사현장 주변 주택 지역에 국지적으로 지하 공간(지하실, 지하주차장)

Table 4. Groundwater levels in the vicinity of the study area.

Observation well number	Measurement date (mm.dd.yyyy)	Groundwater level (GL.-m)	Well diameter (mm)	Well depth (m)	Measurement location
zone-1	OB-1	11.24.2005	6.61	200	Han* bank
	OB-2	11.23.2005	6.84	65	Yong* post office
	OB-3	11.23.2005	5.92	200	Seo* police office
zone-2	OB-4	11.24.2005	4.23	150	Jae* bank
	OB-5	11.24.2005	4.16	200	Sun* Church
	OB-6	11.23.2005	4.19	100	Yong* dong office
	OB-7	11.23.2005	4.67	65	Dae* car wash

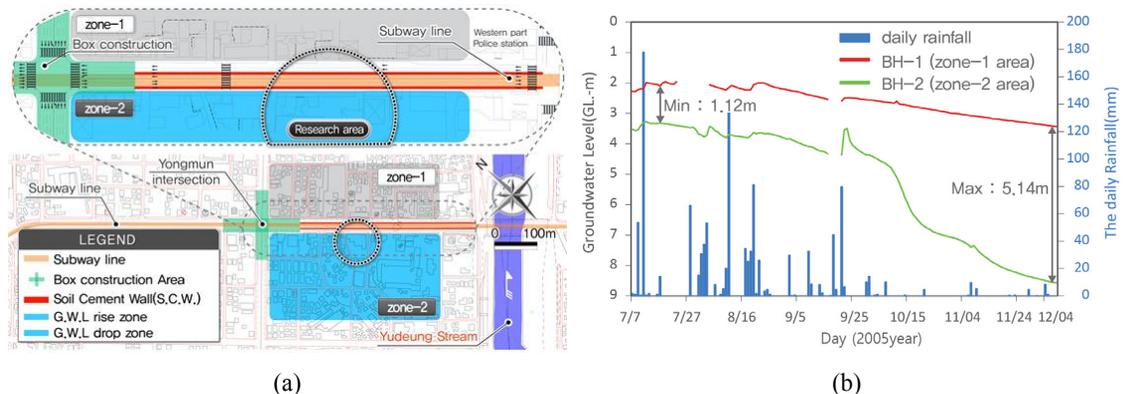


Fig. 8. (a) Schematic diagram of configuration of construction structures in the study area. (b) Temporal changes in groundwater levels at BH-1 and BH-2 and rainfall rate.

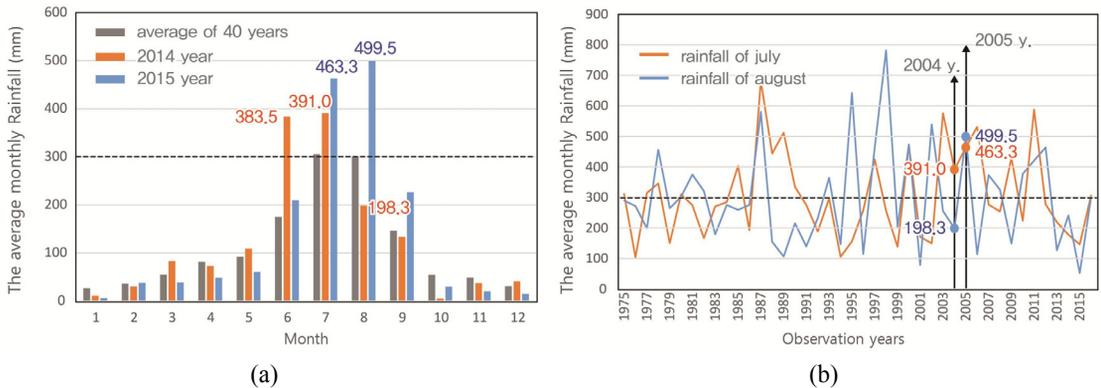


Fig. 9. (a) Monthly precipitation changes and (b) annual precipitation changes during rainy season (July and August).

의 침수가 확인되어 2005년 11월 지하철 공사현장 주변에서 사용되고 있는 일반 지하수 관정을 활용하여 지하수위를 측정하였다. 수위측정 결과, zone-1 지역의 평균 지하수위는 GL. -6.44 m, zone-2 지역은 GL. -4.31 m의 평균 지하수위를 나타내었다(표 4). 건설현장 주변 침수 피해 민원현황을 분석한 결과 2004년 8월 최초 침수 민원발생을 시점으로 2005년 8월까지 20여 곳 이상의 침수피해가 확인되었고, 침수에 의한 민원지역은 모두 지하철 공사현장으로부터 100 m 이내 거리에 위치한 zone-2 지역에 위치한다(그림 8a).

상기 지하수 이상변동 현상의 원인분석을 위해 대전지역 강우자료를 분석한 결과(그림 9), 연구지역은 국내 우기특성과 같이 6월부터 9월까지 강우가 집중되는 현상을 보이고 해당현상이 발생한 2004 ~ 2005년 6월, 7월, 8월은 다른 년도에 비해 상대적으로 높은 강수량을 나타내었다(그림 9a). 해당지역의 40년 월평균 강우량이 6월 175 mm, 7월 306 mm, 8월 300 mm 임을 고려할 때, 연구지역의 침수가 나타난 2004 ~ 2005년은 약 400 ~ 500 mm 내외의 월별강우가 계속되어 지하수위 상승에 근본적인 원인을 제공한 것으로 판단되며, zone-2 지역은 풍수기 기간 동안 최대 GL. -1.96 m까지 수위가 상승하는 현상이 발생하였다.

그러나 위와 같은 강우영향에 기인한 지하수위 변동은 zone-1 지역의 풍수기 설계수위와 대비한 수위 강하현상의 원인으로 해석하기엔 무리가 있다. 이에 zone-1과 zone-2 사이에 위치한 지하철 공사현장의 인위적인 요인을 추가적으로 분석하여 지역

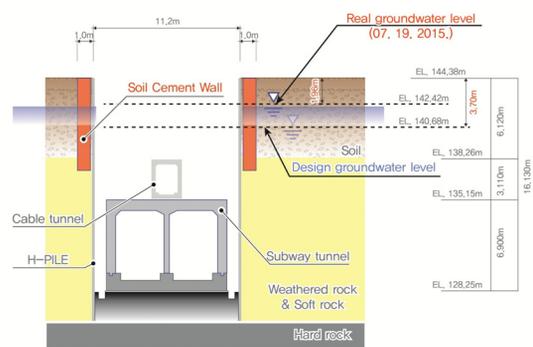


Fig. 10. Schematic diagram of the structural components of subway.

적인 수위상승과 강하 원인을 분석한 결과, 해당 공사구간은 개착식 박스구조물 공법이 적용된 정거장 구간과 개착식 토사시멘트 차수공법(Soil Cement Wall, S.C.W.) 구간으로 나뉘며, 지하철 계획 노선 전 구간에 걸쳐 토사층의 지하수 유입차단을 위한 차수벽이 설치되었다(그림 8a). 차수벽은 두께가 1 m 내외인 모래와 시멘트의 혼합체로써 투수성이 매우 낮은 매질로 구성되고 지표하 7.0 m 심도까지 설치하였다(그림 10). 이와 같이 불투수에 가까운 차수벽의 설치 주변 충전대수층의 지하수 유동에 단절 현상을 유발하고 zone-1과 zone-2 지역의 충전대수층의 흐름을 차간하는 원인으로 작용하여 두 지역의 지하수 이상변동을 발생시킨 것으로 판단된다. 이러한 현상은 그림 8b와 같이 zone-1, 2 지역에 설치된 관측공의 수위변화 그래프를 통해서도 확인되었으며 해발 약 44.4 m인 평탄한 지역의 연구지역 내 이격거리 70.0 m 지점의 관측공에서 지하수 수위차가

풍수기에 최소 1.12 m, 갈수기에 최대 5.14 m까지 차이를 나타내어 차수벽 설치에 의한 상기 지역의 지하수 흐름단절 현상을 확인하였다. 또한, 당시 현장 확인을 통해 침수 구조물의 표고 및 누수의 원인을 확인하였으나, 해당 지역 내 교회식당, 동사무소 지하실 지하노래방 등의 지하시설 전체가 1.0 ~ 1.5 m 침수되는 현상을 구조물의 결함으로 판단하기 어려우며, 과거 강우자료와 침수사례 탐문조사를 통해서도 강우에 따른 침수피해 연관성은 보고되지 않았다.

지하수 유향시험 결과에서도 zone-2 연구지역 충전대수층은 NE ~ E방향의 흐름이 우세하며, 산계 및 지형분석을 통해 확인된 광역 지형구배는 약 2.5 km 서측에 위치한 도솔산(EL. 207 m)으로부터 동측의 유등천(=EL. 140 m)에 이르는 서고동저형 지형으로 지하수의 광역 수리 경사도 역시 동일한 양상을 나타낸다. 따라서 현재 유로가 차단된 구하도

주변 충전 대수층의 지하수 흐름은 유등천 본류방향 유입 흐름이 우세하게 나타나며, NE ~ N 방향의 지하수 유동이 인공 차수벽에 차단되어 zone-2 지역의 지하수 흐름 정체를 발생시키고 지하수위 상승의 원인으로 작용한 것으로 판단된다. 또한 지하철 공사현장의 NE방향에 위치하는 zone-1 지역은 정거장 박스 구조물과 S.C.W. 차수벽에 의해 남서부로부터의 충전층 지하수의 공급이 과거에 비해 크게 감소하여 상대적인 지하수위 강하를 유발한 것으로 사료된다.

5.3 지하수 모델링을 활용한 대책방안 제시

이와 같은 연구지역 지하수위의 이상 변동현상 문제해결을 위하여 지하수 유동모델링을 통한 대책방안을 마련하였다. 상기 분석결과를 통해 확인된 연구지역의 지하수위 상승/강하 원인은 인공적인

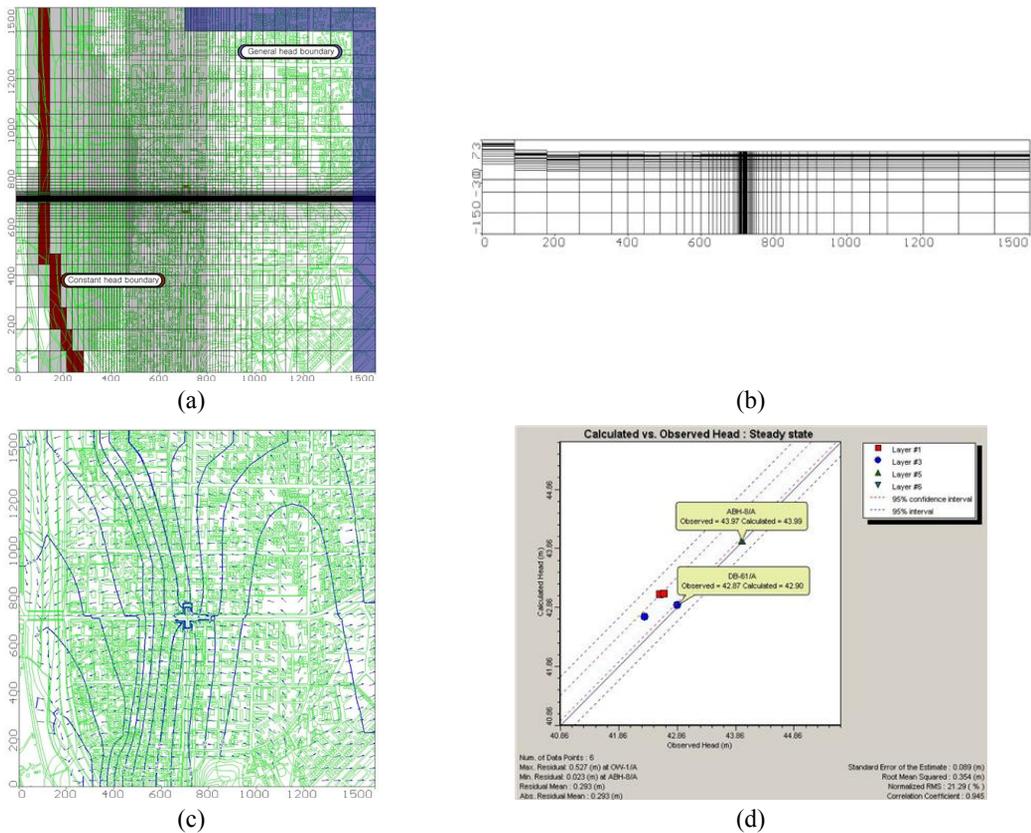


Fig. 11. Groundwater flow modeling of (a) mesh and boundary conditions in top view, (b) cross section of mesh, (c) steady state flow, (d) comparisons of measured and simulated groundwater levels at the observation wells after numerical modeling calibration.

차수 구조물에 기인한 현상임에 따라 충전층의 지하수 흐름이 과거의 자연흐름 상태를 유지하고 지하철공사에 영향을 최소화할 수 있는 지하수 인공유로의 설치 위치와 구간 및 심도를 설계하여 모델링을 통해 시공 후 지하수위 변화를 예측하였다.

유동모델링은 유한차분 모델인 MODFLOW를 사용하였으며, 1.5 × 1.5 km 영역을 100 × 63개 격자망으로 구성하고 인공유로 설계구간은 5 × 1 m의 세밀한 격자망을 구성하였다. 대수층의 구간별 수리시

험을 통해 확인된 수리상수를 3개의 지층으로 구분하여 설정하였으며, 경계조건은 지형능선 부근이다. 다른 위치보다 높으면 지하수 분수령이 형성되어 것으로 지하수 흐름에 주 유동력을 갖는다고 가정하였다 (Anderson and Woessner, 1992). 연구지역 일대의 지형 및 유향유속시험을 통해 확인된 지하수 흐름방향을 고려하여 광역적 흐름이 예상되는 서측과 남서측에 수두종속경계(general head boundary) 조건을 입력하였으며, 연구지역 외가에 위치한 해발 80 ~ 90 m의 소규모 지형 분수령을 유역경계로 설정하였다. 또한, 주요 모델링 영역 일대가 완만한 평지를 이루는 특성을 고려하여 경계조건 영향을 최소화하기 위해 1 km 내외의 충분한 이격위치에 경계조건을 입력하였고, 경계의 유입량은 지하수 주 유동력을 갖는 투수층의 수리전도도를 이용하여 도출된 값을 적용하였다. 동측은 유등천의 규모와 수두변화를 고려하여 고정수두경계(constant head boundary)로 설정하였다(그림 11a). 지하수 함양율은 해당지역이 도심지역임을 감안하여 강수의 5%를 설정하였으며, 이는 모델링 보정과정에서 시행 오차법에 의해 도출된 최적값을 적용하였다. 또한, 지하수 흐름에 가장 큰 영향을 미치는 수리전도도는 현상 수리시험을 통해 확인된 결과를 적용하였으며, 이 밖의 제반 수리지질 특성 인자를 이용하여 정류상태 지하수두 보정을 실시한 결과, 제한된 관측공의 RMS 오차는 다소 큰 값을 보이나 주요 관측공 지점의 모델링 지하수두의 분포는 실측자료 평균오차 0.03 m를 나타냈다. 지하수 흐름 유도를 위한 인공유로는 맹암거(stone filled drain)를 설계하였으며, 모델링에서의 맹암거 수리전도도는 1.0×10^{-4} m/sec로 모래자갈층의 투수성을 적용하여 암거구조물 해당 셀에 수리전도도를 부여한 조건을 적용하였다.

분석결과 맹암거의 위치는 정거장구간 설치 시 최대 효과를 발생시킬 수 있으나 정거장 구조물의 시공성과 안정성을 고려하여 적용지역에서 제외하였다. 이에 맹암거의 최적위치는 그림 12b와 같이 정거장과 정밀조사지역 사이의 지점에 설정하였으며, 맹암거 설치구간은 S.C.W. 차수벽을 제거하고 길이 60 m, 깊이 4.5 m, 폭 6.0 m 규모의 지역에 쇄석을 설치하는 방안을 마련하였다(그림 12c). 모델링은 맹암거의 설치 전후와 30년간 평균 강우량 및 풍수기 최대 강우강도 조건으로 실시하여 수위 변화

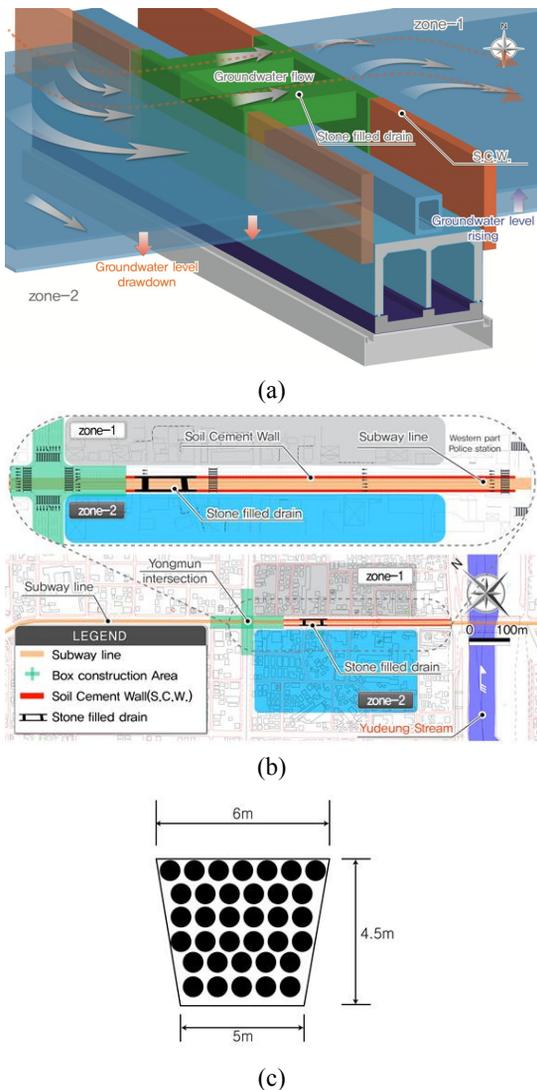


Fig. 12. Schematic diagram of proposed (a) stone filled drain, (b) installation location and (c) the proposed stone filled drain cross section.

를 분석한 결과, 맹암거 설치 시 zone-2 지역의 수위 강하는 평균 1.59 m로 민원발생 지하구조물의 바닥 심도 보다 낮은 수위를 나타내었다(표 5). 상기 내용을 종합하여 2005년 12월 맹암거 설계내용을 제안하였으며, 맹암거 시공 및 현장 반영은 2006년 1월부터 시행되었다. 이후 지하수위 이상변동 해당 민원은 건설사의 보안사항으로 추가적인 모니터링 조사결과를 확인할 수 없었으나, 지역주민 탐문조사와 해당 공사 관계자를 통해 맹암거 설치 년도인 2006년 7월, 500 mm 내외의 강우(평균 300 mm)에도 zone-2 지역의 상기 현상에 대한 추가 침수민원이 발생하지 않았음을 확인할 수 있었다.

6. 결 론

구하도는 자연적인 요소가 지배적이던 과거로부터 인위적인 요소에 의해 영향을 받는 현재까지의 하천 변화 과정을 담고 있으며, 하천에 의해 형성된 구하도에 대한 자료는 과거 하천의 지형 및 수리적 특성에 대한 정보를 제공해 준다(Lee 2011). 또한 구하도에 나타나는 지형적 특징에 대한 분석을 통해서도 구하도 상을 흘렀던 과거 하천유량 및 유로, 곡류 체계 등 하천의 지형 및 수리적 특성을 파악할 수 있으며(Dury, 1965; Rotnicki, 1983; Page and Nanson, 1996; Page *et al.*, 1996), 이는 수변지역의 현 지하수

Table 5. Measured groundwater levels in the observation wells before and after the installation of the artifact.

Observation well	Base level	Before installation of the artifact		After installation of the artifact	
		Annual average groundwater level	Average groundwater level in the rain season	Annual average groundwater level	Average groundwater level in the rain season
BH-1 (zone-1)	Elevation level (m)	43.99	45.50 ~ 46.08	42.38 ~ 42.44	42.84 ~ 43.11
	Ground level (-m)	2.25	3.80 ~ 3.95	3.80 ~ 3.95	3.13 3.28
BH-2 (zone-2)	Elevation level (m)	42.99	44.41 ~ 44.74	42.44 ~ 42.51	42.89 ~ 42.96
	Ground level (-m)	3.40	1.50 ~ 1.65	3.73 ~ 3.87	3.28 ~ 3.43

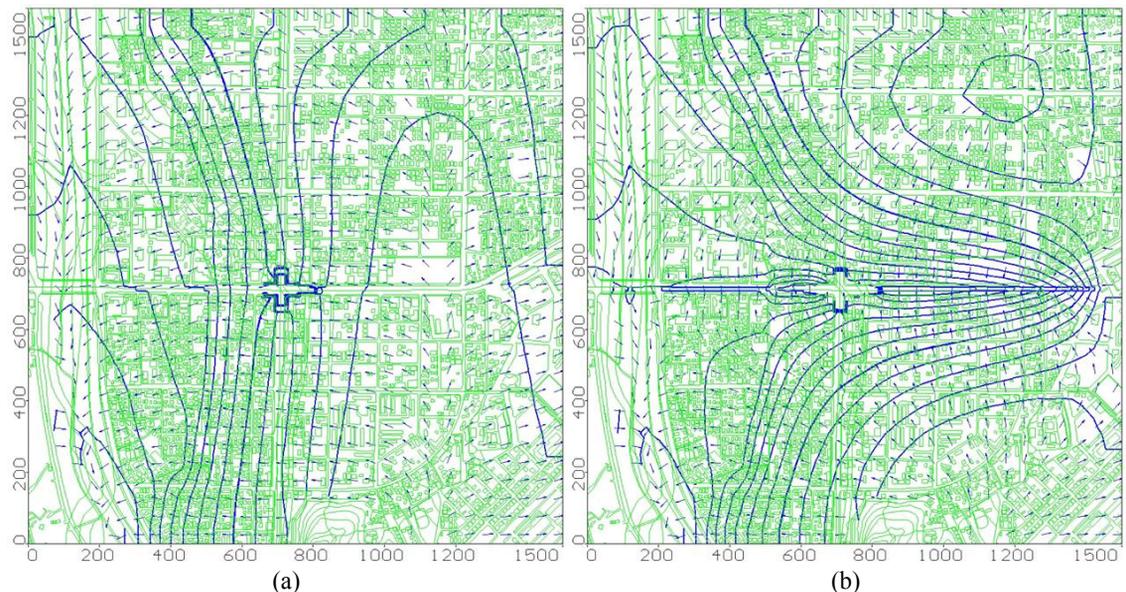


Fig. 13. Spatial distribution of groundwater levels and groundwater flow in the study area (a) before the installation of Stone filled drain and (b) after the installation of Stone filled drain.

유동특성을 이해하는데 매우 중요한 요소이다. 금번 연구지역의 지하수위 이상 변동 현상도 수변지역의 구하도 수변 층적층의 흐름 특성을 고려하지 않은 차수벽의 설치에 해당기간의 높은 강우강도와 맞물려 발생된 현상임을 확인하게 되었으며, 수변지역 개발 및 공사 시 해당지역을 비롯한 주변 구하도의 분포 및 수리적 특성의 중요성이 시공 중 확인된 사례이다.

따라서 수변지역 구하도의 유로와 하폭, 곡류 지형을 고려한 하상퇴적 및 침식 환경, 구하도 층적층 분포와 지층별 수리적 특성 조사/분석은 방사형 집수시설 등의 수변지역 대수층 개발의 성공을 위한 필수요소라 하겠다.

사 사

본 연구는 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원에서 위탁시행한 물관리 연구사업(11기 술혁신C05)에 의한 '수변지하수활용고도화' 연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 아울러 본 논문의 완성도를 높이기 위해 면밀히 검토해 주신 익명의 심사위원 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

REFERENCES

- Anderson, M.P. and Woessner, W.W., 1992, Applied groundwater modeling - Simulation of flow and advective transport. Academic Press, Inc., 381.
- Cha, E.J., Lee, S.H. and Kim, G.B., 2015, Changes in shallow groundwater levels and hydrochemistry according to depositional environment, river water level and groundwater pumping in the riversides. *Journal of the Geological Society of Korea*, 51, 67-80 (in Korean with English abstract).
- Dury, G.H., 1965, Theoretical Implication of Underfit Streams. *United States Geological Survey Professional Paper 452-C*, Washington.
- Larkin, R.G. and Sharp Jr., J.M., 1992, On the relationship between river-basin geomorphology, aquifer hydraulics, and groundwater flow direction in alluvial aquifers. *Geological Society of America Bulletin*, 104, 1608-1620.
- Lee, G.R., 2011, Study on types and distributional properties of abandoned channels in Korea. *Journal of the Korean Geography Society*, 46, 304-318 (in Korean with English abstract).
- Lee, S.M., Kim, H.S. and Nah, K.C., 1980, the geological map of Daejeon sheet (Scale 1:50,000). *Geoscience and Mineral Resources (GMR)*, Seoul, Korea, 54 p, 1 map sheet.
- Oh, J.H., Kim, T., Sung, H.C., Kim, Y.J. and Song, M.Y., 2007, Interaction between groundwater and stream water induced by the artificial weir on the streambed. *Journal of Korean Society of Soil and Groundwater Environment*, 12, 9-19 (in Korean with English abstract).
- Page, K.J., Nanson, G.C. and Price, D., 1996, Chronology of Murrumbidgee River palaeo-channels on the Riverine Plain, Southeastern Australia. *Journal of Quaternary Science*, 11(4), 311-326.
- Page, K.J. and Nanson, G.C., 1996, Stratigraphic architecture resulting from Late Quaternary evolution of the riverine plain. Southeastern Australia, *Sedimentology*, 43, 927-945.
- Rotnicki, K., 1983, Modelling past discharges of meandering river. *Background to Paleohydrology*, Wiley, 321-354.
- Tóth, J., 1963, A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *Journal of Geophysical Research*, 68, 4795-4812.
- Won, J.C., Lee, J.Y., Ji, J.M., Park, Y.A., Kim, J.H. and Kim, H.S., 1989, Principles of Geology. *WooSeong munhwasa*, Seoul, 662 p (in Korean).

Received : June 1, 2016

Revised : June 24, 2016

Accepted : June 27, 2016