한국지하수토양환경학회 춘계학술대회
2006년 4월 14일 동국대학교

창녕군 증산리 지역 강변여과수 타당성 조사 및 시험 정호 설치

김형수 · 원이정 · 석희준 · 박철숙

한국수자원공사 수자원연구원
e-mail : hskim@kowaco.or.kr

요 약 문

창년군 증산리 지역은 신규 취수원 확보 일환으로 강변여과 방식 취수 가능성이 한국수자원공사에 의해서 평가되고 있는 지역이다. 강변여과 방식 취수의 타당성 평가를 위해 현장 지질조사, 시추조사, 전기 비저항 탐사 및 고해상도 탄성파 탐사를 수행하였다. 또한 대상 연구지역에서의 개략적 취수 가능량 산정을 위해 모델링 평가가 수행되었으며, 개별 정호에 대한 양수량 산정을 위해 시험 정호를 설치하였다. 현장 시추 조사와 시료에 대한 입도 분석 결과, 연구 지역의 충적층 두께는 35 m 전후이며, 주 대수층 구간은 지표하 25~35 m인 것으로 추정되었다. 또한 주 대수층 구간의 수리전도도는 10^{-2} cm/sec 이상으로 주로 모래섞인 자갈층으로 구성되어있는 것으로 평가되었다. 또한 전기비저항 조사 결과는 부분적으로 매우 낮은 비저항 분포 지층을 보여주고 있으며, 이는 주로 실트 및 점토로 된 지층이 부분적으로 퇴적되어 있음을 지시하며, 고해상도 탄성파 탐사 결과는 전반적으로 지하수위는 지표하부 5 m 전후에 분포하고, 충적층의 하부 경계는 35 내지 45 m인 것으로 해석되었다. 지하수 모델링을 통해, 취수 목표량인 180,000톤/일은 주대수층까지의 지하수위 강하 없이 확보 가능할 것으로 평가되었다. 또한 개별 정호의 산출 특성을 평가하기 위해 시험 정호를 설치하여, 실제 2,700톤/일 예비 양수 시험을 수행하였다. 예비 양수 시험 결과, 양수정에서의 수위 강하는 개략 10 m, 양수정관측정에서는 약 0.3 m의 수위강하만이 관찰되었으며, 양수 영향권이 수 십 m를 넘지 않을 것으로 판단되었다.

주요어 : 강변여과, 타당성 평가, 충적층, 정호 설계, 정호 시공

1. 서 론

강변여과 취수 방법은 유도 방식 지하수 인공 함양 기법으로, 독일 등 유럽 라인강 인접 국가에서는 오래전부터 사용하고 있는 기법이며, 최근 들어서는 미국 등도 지표수의 높은 탁도 제거와 수질 개선을 위해 활용되고 있는 기술이다. 한편, 국내에서도 창원시를 비롯해 낙동강과 한강의 인접 지방자치단체들이 강변여과 방식에 대한 타당성 평가 및 취수 사업을 진행하고 있다(김형수 등, 2004). 한편, 한국수자원공사에는 기존의 취수 방식을 강변여과방식으로 변경하기 위한 방안을 수립 중이며, 이러한 방안의 일환으로 창녕군 증산리 지역에서의 강변여과 방식 취수의 타당성을 국가 프런티어 연구과제와 연계하여 조사, 연구하고 있다. 본 연구의 목적은 대상 지역 충적층의 수직 분포, 충적층의 수리지질 특성 등을 규명하고 실제 계획된 취수량을 확보할 수 있는 지의 여부를 평가하기 위한 것이다. 또한 본 연구는 시험 정호를 직접 설계, 설치하여 충적층 우물 산출량에 중요 요소가 무엇인지를 예비적으로 평가하고 추후 대단위 우물장(well field) 형성 시, 우물 설치 비용을 고려한 착안 사항이 무엇인지를 구체화하기 위한 목적도 포함하고 있다.

2. 연구지역 일반

연구 지역은 행정구역상으로 경상남도 창녕군 길곡면 증산리에 해당되며, 낙동강을 경계로 남측에 창원시와 함안군이 위치한 지역이다. 개략적으로 이 지역의 충적층은 동서 방향으로 약 4km, 남북 방향으로 약 2km의 크기로 분포한다. 기본적 수계 형태는, 동서 방향의 낙동강으로 길곡천, 마천천, 온정천이 북측에서 남측으로 유입되는 형상이다. 특히 길곡천의 경우, 상류의 상길 저수지로부터 약 3km 하류부에서 좁은 골짜기를 빠져 나오면서 선상지의 형성하며, 본류 충적층을 통과하여 낙동강으로 유입되었던 것으로 항공사진 분석 결과 판단된다. 이러한 조건은 상대적으로 많은 조립질 성분을 낙동강 본류 충적층에 퇴적 시켰을 가능성을 보여준며, 연구 지역의 배후에도 양호한 지하수 투수조건과 함양 조건을 지니고 있을 가능성을 보여준다. 현재의 길곡천은 농수로 개보수에 의해 연구 대상 충적층을 우회하여 낙동강으로 유입하고 있다.

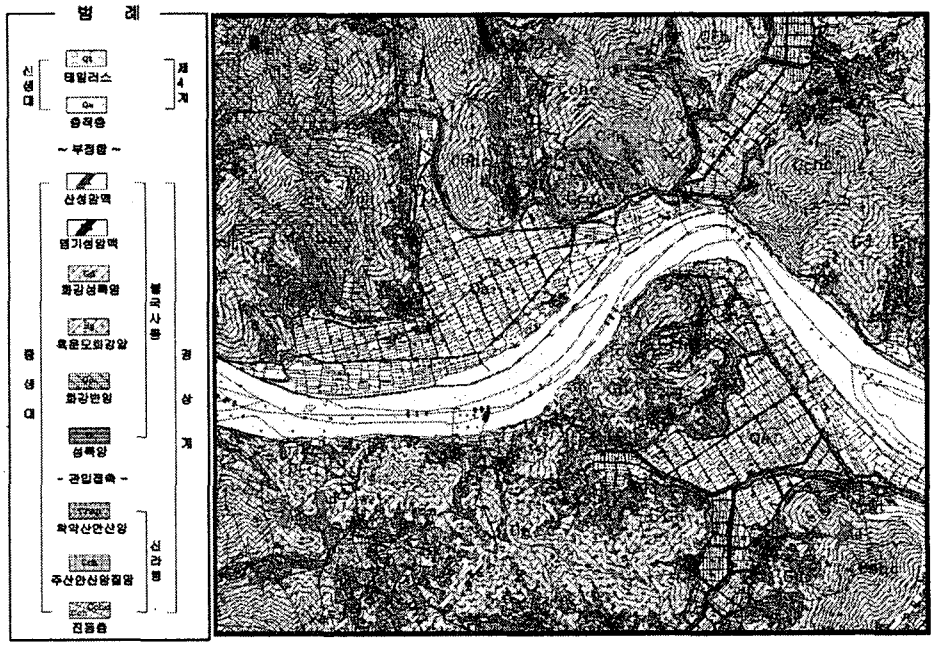


그림 1. 창녕군 증산리 연구 지역 충적층 분포 및 인접부 지질

기존 지질 도폭(김남장, 이홍규, 1964)을 참조하면 연구 대상 충적층의 기반암은 백악기 경상계 신라통의 진동층에 해당될 것으로 추정된다. 연구 대상 지역의 진동층은 주로 회색, 암회색, 암갈색의 셰일, 일부 처어트질 암석 및 암회색의 아코스 사암질이 협재하는 형태를 갖고 있다고 알려져 있다(그림 1 참조). 본 층은 층리의 발달이 우세하고 처어트질 암석 이외의 경우, 상대적으로 풍화에 약한 이유로 낮은 구릉지 및 평지를 이룬다. 연구 대상 지역의 동측 임해진 지역 낙동강 좌안 도로에서 전형적인 노두를 관찰할 수 있으며, 뚜렷한 퇴적구조와 층리가 관찰된다. 연구 대상 지역 서단 배후 산지에서는 화강 섬록암이 관찰되며, 이 화강 섬록암은 진동층을 관입하고 있다. 기존 지질 도폭에는 진동층내에 산성 암맥류가 발달하고 있으며, 이 암맥류는 화강 섬록암의 관입과 연관되는 것으로 사료된다.

3. 현장 조사 및 예비 수리지질 특성 분석

현장 조사는 크게 시추조사, 전기비저항 탐사 및 고해상도 탄성파 탐사를 통해 수행되었다. 시추 조사는 12개의 신규 시추를 수행하였으며, 기존 하천개수공사와 관련하여 시추된 2개공의 자료를 참조하였다. 전기비저항 탐사는 2차에 걸쳐 수행되었으며, 총 5개소에서 자료를 확보하였다. 고해상도 탄성파 탐사는 5개 측선 총 연장 길이 1,325m에 대하여 수행되었으며, 이중 4개 측선은 하천 흐름에 수직한 방향으로, 1개 측선은 하천 흐름과 평행한 방향으로 수행되었다.

시추 조사를 통해 본 지역 충적 대수층의 분포와 개략적 투수 계수를 산정하였다. 투수 계수 산정은 확보된 12개공 시추 자료의 시료를 입도 분석하여, 입도 분석에 따른 경험 공식인 Hazen 방법(Hazen, 1911)을 이용하였으며, 이 때 계수 값의 범위는 분급 양호 중립질 모래 혹은 분급 불량 조립질 모래에 해당되는 80~120의 값을 사용하였다. 표 1은 입도 시험을 통해 평가된 투

수 계수의 값을 보여준다.

이러한 입도 분석 방법에 의한 투수 계수 산정은 직접적인 양수 시험을 통한 대수성 평가에 비해 간편하고 경제적으로 미고결 지층의 대수성을 평가할 수 있으므로, 본격적인 정밀 대수성 평가에 앞서 수행되었다. 개략적인 수리 지질 특성 분석 결과, 전체 충적층의 두께는 약 35m 전후, 투수성이 양호한 대수층의 구간은 지표 하부 25부터 35m인 것으로 평가되었다. 한편 동일 지역에서 대하여 수행된 전기비저항 탐사, 고해상도 탄성파 탐사를 통해 대수층 분포 및 수리지질 특성이 함께 비교 분석되었다.

표 1. 입도 분석을 통한 연구지역 지층 투수계수 분포 추정 결과

공 번호	시료 채취 심도 (m)	10%입경(㎜)	Kmin(㎝/s) C=80	Kmax(㎝/s) C=120
BHA1	16.5/18.5	0.2091	0.0350	0.0525
	22.5/24.0	0.3112	0.0775	0.1162
	25.5/27.0	0.3444	0.0949	0.1423
BHA2	16.5	0.2141	0.0367	0.0550
	19.5/21.0	0.6317	0.3192	0.4789
	22.5/24.0/25.5	0.2042	0.0334	0.0500
BHA3	30.0	0.4143	0.1373	0.2060
	31.5/33.0	0.4205	0.1415	0.2122
BHA5	33.0/34.5	0.2339	0.0438	0.0657
BHA6	31.5	0.0896	0.0064	0.0096
BHA7	30.0	0.7543	0.4552	0.6828
BHA8	24.0/25.5	0.3385	0.0917	0.1375
BHA9	24.0/25.5	0.4016	0.1290	0.1935
	28.5/30.0	0.3552	0.1009	0.1514
	34.5/36.0/39.0	0.3948	0.1247	0.1870
BHA10	25.5/27.0	0.5879	0.4148	0.5184
BHA11	24.0/25.5	0.4096	0.1342	0.2013
BHA12	24.0/25.5	0.2767	0.0613	0.0919

연구 지역에서의 전기 비저항 조사는 2차에 걸쳐 수행되었다. 1차 조사는 반 슐럼버저 배열 방식을 이용한 수직 조사 방식으로 수행되었으나, 획득된 자료에 대한 분석 결과, 잡음이 많고 특히 기반암 예상 심도 부분의 조사 자료가 뚜렷하지 않아 해석이 곤란하였다. 이러한 문제로 인해 2차 조사에서는 슐럼버저 배열을 통한 수직 전기 비저항 조사를 수행하였다. 이들 전기비저항 조사 측점의 위치 중, E-1부터 E-36까지의 조사 측점은 제내 경작지 하부의 충적층 분포를 추정할 수 있는 자료를 제공하며, E-37부터 E-46까지와 E-47 및 E-48은 자연 제방 근처 하부의 충적층 분포를, 그리고 E-49부터 E-55까지의 조사 지점은 제외 하상바닥 하부의 충적층 분포를 추정할 수 있는 지점들이다. 조사 결과, 거의 조사 자료는 양호한 신호를 보여주며, 대부분 조사 지점 해석 결과는, ㉠지표부위 전기 비저항 변화층, ㉡지표 변화층 하부의 습윤 상태 점토 혹은 실트 협재 등에 따른 매우 낮은 전기 비저항 분포층, ㉢그 하부 지하수에 완전 포화된 모래질과 자갈 혼재로 인한 낮은 전기 비저항 분포층 및 ㉣최하부 부분적 풍화 혹은 절리 발달 등으로 수 백 ohm-m 전후의 전기 비저항 분포를 갖는 기반암층으로 구분될 수 있음을 시사하고 있다.

고해상도 탄성파 탐사는 CMP 굴절법과 고해상도 P빔 활용 반사법 조사의 두 가지 방식으로 수행되었다. 본 탄성파조사는 전술한 바와 같이, 지표면 탄성파 반사법 탐사를 통하여 창녕군 길곡면 중산리 일대 충적대수층의 하단 경계면 및 지하수면을 규명하는 데 목적이 있었다. 탄성파 탐사 결과 작성된 대수층의 상부는 지하수면, 하부는 기반암 경계면에 해당된다. 모든 최종 탄성파 해석 단면은 공통적으로 대수층이 크게 몇 개의 층으로 구분될 수 있음을 알 수 있었으며, 이 중 특정 경계가 실제 조립질 모래와 자갈로 구성된 하부 주

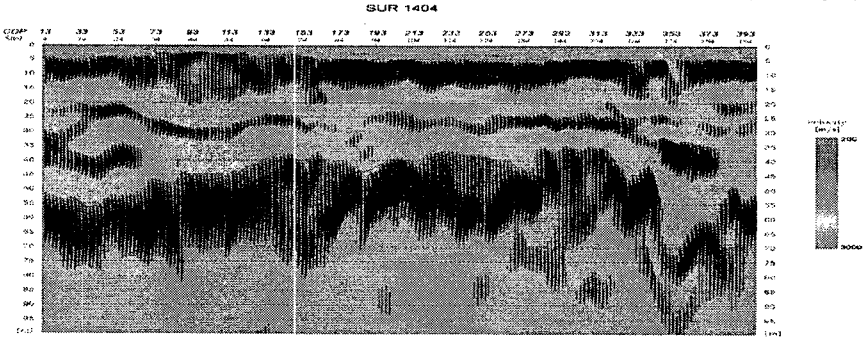


그림 2 중산리 탄성파 측선(SUR 1404) 최종 해석단면

대수층과 상대적으로 세립질인 실트 혹은 점토가 함유된 상부 피압 역할 포화 지층의 경계면으로 해석될 수 있는 것으로 판단된다. 그림 2는 수행된 탄성파 조사를 통해 얻어진 최종 심도 해석 단면 (depth section)의 사례이다.

4. 취수 가능량 모델링 평가 및 시험 정호 설치

연구 대상 지역에서의 개략적인 취수 가능량을 산정하기 위하여, 지하수 모델링을 이용한 평가를 수행하였다. 시추 조사와 지구물리 조사를 근거로 대상 지역의 지층은 크게 2층 구조로 구분하였으며, 경계조건은 산지의 능선을 따라 비흐름(no flux) 경계조건, 하천부의 경우 갈수기 수위를 기준으로 한 일정 수두(constant head) 경계 조건을 선정하였다. 강우에 의한 함양률은 년간 200㎜를 가정하였으며, 2층 구조에 대한 지층별 수리 지질 특성값은 다음 표 2와 같이 가정하여 모델링을 수행하였다.

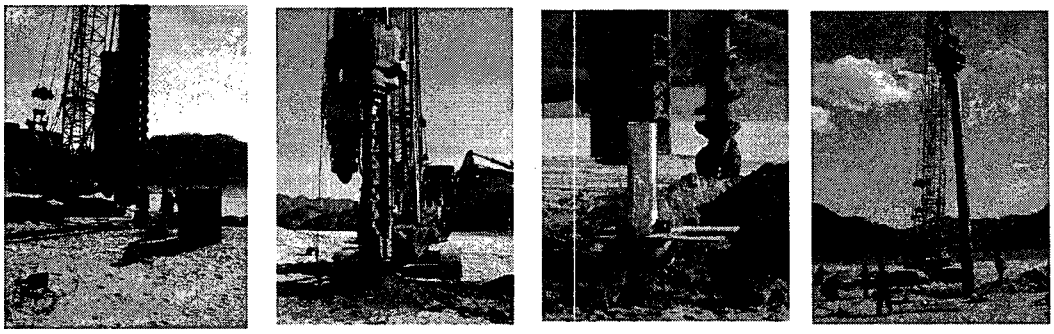
표 2 지하수 수치 모델링을 위한 지층별 수리 지질 물성 가정치

물성치 / 지층	수평 수리전도도 (cm/s)	수직 수리전도도 (cm/s)	비저류계수 (Ss, m^{-1})	비산출률 (Sy,dimensionless)	공극률
상부층	1.79e-4	1.79e-5	0.0001	0.2	0.2
하부층	5.79e-2	5.79e-3	0.0001	0.2	0.2

지하수 모델링 결과, 10개의 군집형태로 배치된 총 70개의 수직 양수정을 통해 총취수량 210,000㎥/일로 양수할 경우, 최대수위강하는 약 21m 정도이며 이러한 수위 강하는 주대수층구간까지 수위강하가 발생되지 않는 것으로 평가되었다. 또한 상대적으로 강으로부터 가까운 군정 그룹에서는 4~12m의 수위강하가, 제내지 지역 강으로부터 이격된 군정 그룹에서는 18~21m의 수위강하가 나타났다.

지하수 모델링 평가를 통해 전반적인 취수 가능량을 평가하였으나, 실질적 우물장(well field)의 설치를 위해서는 개별 우물의 산출 능력을 평가가 요구되므로, 연구 현장에, 대수층 특성을 고려하여 연구용 우물을 설계하여 시공하였다. 시공 지점은 제외지 지역으로 자연 제방에서 하천쪽으로 7 m 떨어진 지점으로 법적으로 하천 부지에 속하는 지역이다. 시공 이전에 조사된 예비 시추 조사를 통해, 대수층은 모래 자갈층으로 약 10m(GL-23m~-33m) 정도이며, 주대수층 상부에 세립질 모래가 약 23m (GL 0m~-23m) 가량 존재하는 것으로 확인되었다. 주대수층 이하 GL-35 m 부근에서 풍화암을 기대하여 GL-36 m까지 시공키로 계획하였으며 굴착 결과 GL-33m 이하로는 주대수층 하부에 다시 점토가 섞인 자갈 혹은 전석층이 존재하였고 실제 굴착은 35.8 m까지 수행하였다.

시추는 스크류 방식의 오거 드릴을 사용하였으며, 외부케이싱 설치용 해머를 55 ton 크레인에 장착하여 사용하였다. 65ton 이상의 크레인으로 교체할 경우 스크류의 추가 연결을 통해 36 m 이상의 시추도 가능할 것으로 평가되었다. 주요 시공 순서는 ①외부케이싱(600㎜) 설치, ② 오거시추를 통한 외부케이싱 내부 지층 제거, ③ 내부케이싱(250㎜) 설치 ④ 충진력 1차채움, ⑤ 1차 인발(인발의 간격은 인발기의 능력과 예상 마찰력을 고려하여 선정조치) ⑥ 그라우팅 및 모래채움 ⑦ 2차 인발 ⑧ 모래채움, ⑨ 3차 인발 및 정리, ⑩ Well Development 시행 및 상부 보호공 시설 시공(well development는 기존 에어써징 방식 효율 미흡으로 수중 모터를 이용한 흡입식 써징으로 수행하여 효율 도모, 상부 보호공은 콘크리트 박스 처리 및 상부 유입 방지 시설 시공)이다. 사진 1은 시범 충적층 대형 정호 시설 주요 시공 절차를 보여준다.



(a) 외부케이싱 설치 (b) 굴착 (c) 내부케이싱 설치 (d) 외부케이싱 인발

사진 1 충적층 시범 대형관정 설치 공사 사진

시험 정호는 다양한 인자들에 대한 평가를 통해 설계되었으며, 최종적으로 외부 케이싱 600㎜, 내부 케이싱 250㎜ 직경의 수직형 우물로 시공되었다. 설계 단계에서 스크린 길이, 유입속도 등을 고려한 최대 양수량은 약 3,300톤/일로 평가되었으며, 실제 예비 양수 시험에서 2,700톤/일 양수 시, 양수정에서의 수위 강하는 개략 10 m로 주대수층 위치까지 수위 강하를 하지 않더라도 충분한 양수량이 확보됨을 확인하였으며, 양수정으로부터 9.8 m 이격된 관측정에서는 약 0.3 m의 수위강하만이 관찰되어, 양수에 의한 영향권이 수 십 m를 넘지 않을 것으로 추정되었다. 특히 본 충적층 대형 정호 시범 설계/시공을 통해서 저비용의 내부 케이싱 중심 장치(center guider), 효율적 well development 장치 고안, 충적층에 대한 오거 방식을 통한 대형 정호 설치 기술 등이 확보되었다. 특히 내부 케이싱의 중심 장치는 우물 효율 증대와 더불어 외보 케이싱 인발 중의 내부 케이싱 동시 인발 문제도 저감시키는데도 효율이 있는 기술로 사료되며, 수중 모터를 연계한 well development 장치는 국내 적용이 곤란한 기존 플런저 방식 서징이나 효율이 낮은 에어 블로우 서징 방식을 대치 할 수 있는 현장 실용성 높은 기술로 평가되었다.

4. 결 론

창녕군 길곡면 증산리 지역에 대한, 강변여과 취수 방식의 타당성을 평가하기 위한 현장 조사와 연구가 수행되었다. 강변여과 방식 타당성 평가를 위해 현장 지질조사, 시추조사, 전기 비저항 탐사 및 고해상도 탄성파 탐사가 수행되었으며, 그 결과, 연구 지역의 충적층 두께는 35 m 전후이며, 주 대수층 구간은 지표하 25~35 m인 것으로 추정되었다. 또한 주 대수층 구간의 수리전도도는 10^{-2} cm/sec 이상으로 주로 모래섞인 자갈층으로 구성되어있는 것으로 평가되었다. 또한 전기 비저항 조사 결과는 부분적으로 매우 낮은 비저항 분포 지층을 보여주고 있으며, 이는 주로 실트 및 점토로 된 지층이 부분적으로 퇴적되어 있음을 지시하며, 고해상도 탄성파 탐사 결과는 전반적으로 지하수위는 지표하부 5 m 전후에 분포하고, 충적층의 하부 경계는 35 내지 45 m인 것으로 해석되었다. 지하수 모델링을 통해 취수 목표량인 180,000톤/일은 주대수층까지의 지하수위 강하 없이 확보 가능할 것으로 평가되었다. 또한 시험 정호를 통한 개별 정호 산출량은 2,000톤/일 이상이 가능한 것으로 예비 양수 시험 결과 추정되었으며, 대수층의 수리지질학적 특성과 아울러 정호의 설계 및 시공이 우물 산출량 증대에 중요 요소임을 확인하였다. 본 연구는 21세기 프런티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원(과제번호 3-4-2) 및 한국수자원공사 수도 사업비 지원에 의해 수행되는 과제이다.

5. 참고 문헌

Hazen, A., 1911, Discussion : Dams on Sand Foundation, Transactions, American Society of Civil Engineers 73. 119.

김남장, 이규홍, 1964, 한국지질도 영산도폭(1:50,000), 국립지질조사소

김형수 등, 2004, "지속가능한 지하수 개발 및 함양기술개발" 보고서, 한국수자원공사 연구보고서, KIWE-GG-04-1, 21세기 프런티어 연구개발 사업 "수자원의 지속적 확보기술개발" 세부과제(3-4-1) 1단계 최종보고서, 과학기술부