

여러 가지 양수시험분석방법 적용을 통한 목천지역
암반대수층의 수리지질학적 특성

Hydrogeologic Property of Bedrock Aquifer of Mockcheon Area
Applying Several Pumping Test Analyses

강 래 수 (Lae Soo Kang)	부산대학교 지질학과
함 세 영 (Se-Yeong Hamm)*	부산대학교 지질학과
최 성 자 (Sung Ja Choi)	한국지질자원연구원 지질연구부
이 병 대 (Byeong Dae Lee)	한국지질자원연구원 환경지질연구부

요약 / ABSTRACT

목천지역의 반경 1km 이내에 위치하는 5개 먹는샘물 제조업체(시원샘물, 대정음료, 자인관광, 청수음료, 한주식품)에서 수행된 양수시험자료를 분석하였다. 양수시험분석을 위해서는 Theis(1935), Papadopulos-Cooper(1967), Hantush(1960, 1962), Hantush-Jacob(1955), Moench(1985), Neuman-Witherspoon(1969), Gringarten-Witherspoon(1969), Gringarten-Ramey(1974) 식을 이용하였다. 양수시험 분석 결과, 쐐기형 피압대수층 모델(Hantush, 1962)과 Case-1 누수피압대수층 모델(Moench, 1985)이 연구지역의 암반대수층에 가장 적합한 것으로 나타났다. 상기 모델은 본 연구지역에 나타나는 두 조의 층상단층(N18E 주향의 층상단층과 NS 주향의 층상단층)에 규제되어 만들어진 대수층의 형태와 잘 일치한다.

주요어: 수리상수, 쐐기형 대수층, 지질구조, 편마암, 먹는샘물, 목천

Pumping test data obtained from five natural mineral-water producing companies (Siwon Saemmul, Daejeong Eumryo, Jain Guanguang, Cheongsu Eumryo and Hanju Sikpum) that are located within 1 km radius around Mockcheon area were analyzed. Theis(1935), Papadopulos-Cooper(1967), Hantush(1960, 1962), Hantush-Jacob(1955), Moench(1985), Neuman-Witherspoon(1969), Gringarten-Witherspoon(1969) and Gringarten-Ramey(1974) equations were applied to the pumping test analysis. The result of the pumping test analysis shows that wedge-typed confined aquifer model

* Corresponding author: hsy@pusan.ac.kr

(Hantush, 1962) and leaky confined aquifer Case-1 model (Moench, 1985) were suitable for the study area. The models match well with geologic structure in the study area which controls aquifer by means of two major thrust faults having N18E and NS strikes, respectively.

Key Words: hydraulic constants, wedge-type aquifer, geologic structure, natural mineral water, Mockcheon

서 론

1995년 먹는물 관리법의 시행 이후 먹는샘물 제조업체가 72개 업체로 증가하였다. 먹는 샘물의 총 생산량도 1996년에 891,000 m³/y, 1997년에 1,131,000 m³/y, 1998년에 940,000 m³/y, 1999년에 1,147,000 m³/y, 2000년에 1,427,000 m³/y, 2001년에는 1,849,000 m³/y로 늘어났으며, 앞으로도 지속적으로 증가할 것으로 예상된다(환경부 수질개선부담금 부과현황표). 1998년에 일시적으로 생산량이 줄어든 이유는 외환위기로 인해서 먹는 샘물 소비량이 줄어들었기 때문으로 판단된다. 먹는 샘물의 판매량이 매년 증가하는 것은 국민들의 먹는 샘물에 대한 수요가 증가하였기 때문인데, 먹는 샘물의 수요 증가는 수돗물 원수의 수질 저하와 수돗물에 대한 불신에도 그 원인이 있다. 먹는 샘물은 수돗물 보다 훨씬 높은 가격과 함께 국민 건강과 직결되므로 엄격한 수질 관리가 요구된다. 한편 생산량의 측면에서도 지역에 따라서는 좁은 지역에 다수의 먹는 샘물 제조업체가 밀집되어 지하수 자원이 고갈되고 수질도 악화될 가능성을 안고 있다.

본 연구지역은 충청남도 천안시 성남면 대정리와 충청남도 연기군 전의면 관정리일대의 접도 지역이며, 현재에는 도로 및 농지정리 사업으로 인하여 두 개의 행정구역으로 나누어졌지만, 이전에는 목천면이라는 하나의 행정구역이었다. 현재 이 지역에는 5개 먹는샘물 제조업체(시원샘물, 대정음료, 자인관광, 청수음료, 한주식품)가 반경 1km 내에 밀집되어 위치하고 있다. 연구지역의 중심부에 위치하는 태호고개를 중심으로 북쪽에는 시원샘물, 대정음료 그리고 남쪽에는 자인관광, 청수음료, 한주식품이 위치한다(Fig. 1). 각 업체의 취수정별 취수허가량은 Table 1과 같다.

본 연구지역에 다수의 먹는 샘물 제조업체가 분포하게 된 이유는 이 지역이 조선시대부터 약수로 잘 알려져 있으며, 탄산수(CO₂-rich water)가 산출되는 지역이기 때문이다. 국내에서는 주로 충남 북부 일원, 경북 북부지역, 강원도지역 등에서 탄산약수가 산출되고 있다(김건영 외, 2001).

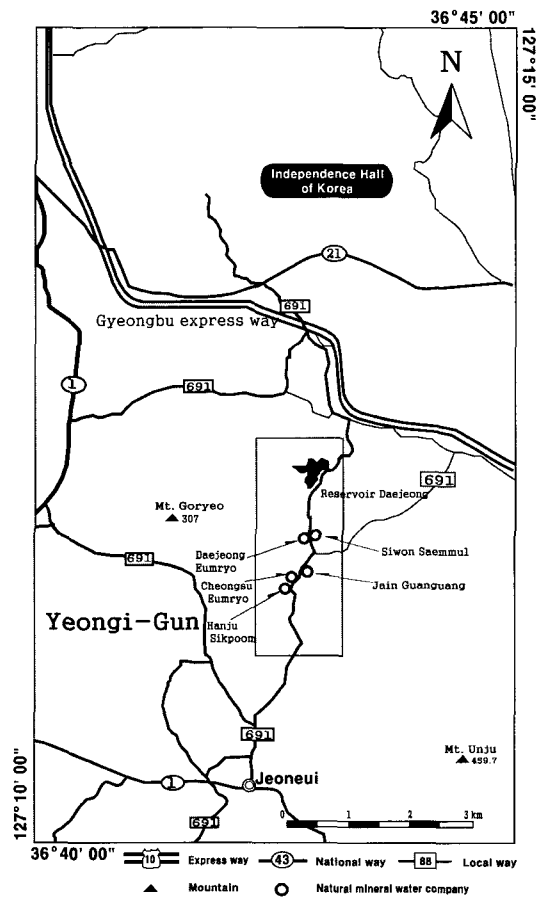


Fig. 1. Location of the study area.

Table 1. Production quantity of the five natural mineral-water companies in the study area.

Natural mineral -water company	Pumping well	Approved quantity (m ³ /day)	Natural mineral -water company	Pumping well	Approved quantity (m ³ /day)
Siwon Saemul	PW-1	40	Jain Guanguang	PW-2	334
	PW-2	80	Cheongsu Eumryo	PW-1	68
Daejeong Eumryo	PW-1	97		PW-2	76
	PW-2	27	PW-3	128	
	PW-3	190	Hanju Sikpum	PW-1	83
	PW-4	290		PW-2	104
Jain Guanguang	PW-1	474	-	-	-

본 지역의 탄산수에 대한 연구로는 충청지역 탄산수의 산출양상과 지화학적 특성 및 생성기원에 대한 연구가 있다(정찬호 외, 2001). 정찬호 외(2001)는 충청지역의 탄산수 특성연구에서 대정리 지역의 탄산수가 타 지역에 비해서 높은 CO₂의 함량(PCO₂=0.25~0.99 기압)을 가지고, 약산성의 pH, 101~2,950 μS/cm의 전기전도도를 가지며, Ca-HCO₃형 내지 Ca(Na)-HCO₃ 형의 화학조성을 가지는 것과, ²H/¹H, ¹⁸O/¹⁶O 동위원소 조성비로 볼 때 순환수 기원임을 밝혀냈다. 또한 탄산수의 탄산염 침전물에 대한 탄소동위원소 분석을 통하여 탄산수내 CO₂는 심부기원이고, 탄산수의 화학성분을 결정된 주요 근원광물은 화강암과 편마암 내 사장석 또는 이차광물로 산출되는 탄산염광물로 해석하였다.

본 연구의 목적은 5개 먹는샘물 제조업체(시원샘물, 대정음료, 자인관광, 청수음료, 한주식품) 주변지역 암반대수층의 수리지질 특성을 규명하고 이를 지질구조와 연관하여 해석하는데 있다.

지질 및 수리지질

연구지역에는 선캠브리아기 편마암류, 중생대

쥬라기의 복운모화강암과 화강섬록암, 백악기의 암맥류 등이 분포한다. 선캠브리아기의 편마암류는 흑운모편마암이 대부분이며 석회-규산염암이 협재된다. 이 편마암은 남북방향의 주 계곡선을 따라서 분포하고 있으며 연구지역의 북동쪽과 남서쪽에 화강암류가 관입하고 있다. 화강암류는 주로 암회색의 화강섬록암이며, 일부지역에서는 복운모 화강암류가 분포한다. 십여조의 중성 및 산성암맥이 선캠브리아 편마암과 쥬라기 화강암류를 관입하고 있다(Fig. 2). Fig. 3은 연구지역 먹는샘물 제조업체 주변의 지질을 확대하여 보여주고 있다.

본 연구지역은 조구조적 규모를 가지는 북동방향의 공주단층계와 N20°E 주향의 추가령단층대의 영향권에 속하는 지역이다. 즉 연구지역은 공주단층계와 추가령단층대가 통과하는 지역에 인접해 있다. 본 연구지역에서 공주단층계는 쥬라기 말과 백악기동안에 좌수향주향이동운동과 정단층운동의 영향을 받았으며 이에 수반되어 R-, P-, T- 전단단층과 암맥들이 형성되었다. 연구지역에는 공주단층계에 수반된 암맥무리 (dike swarm)가 발달하고 있으며 이 암맥무리는 추가령단층대의 Y-, R- 전단단층에 의하여 파쇄되어 대수층의

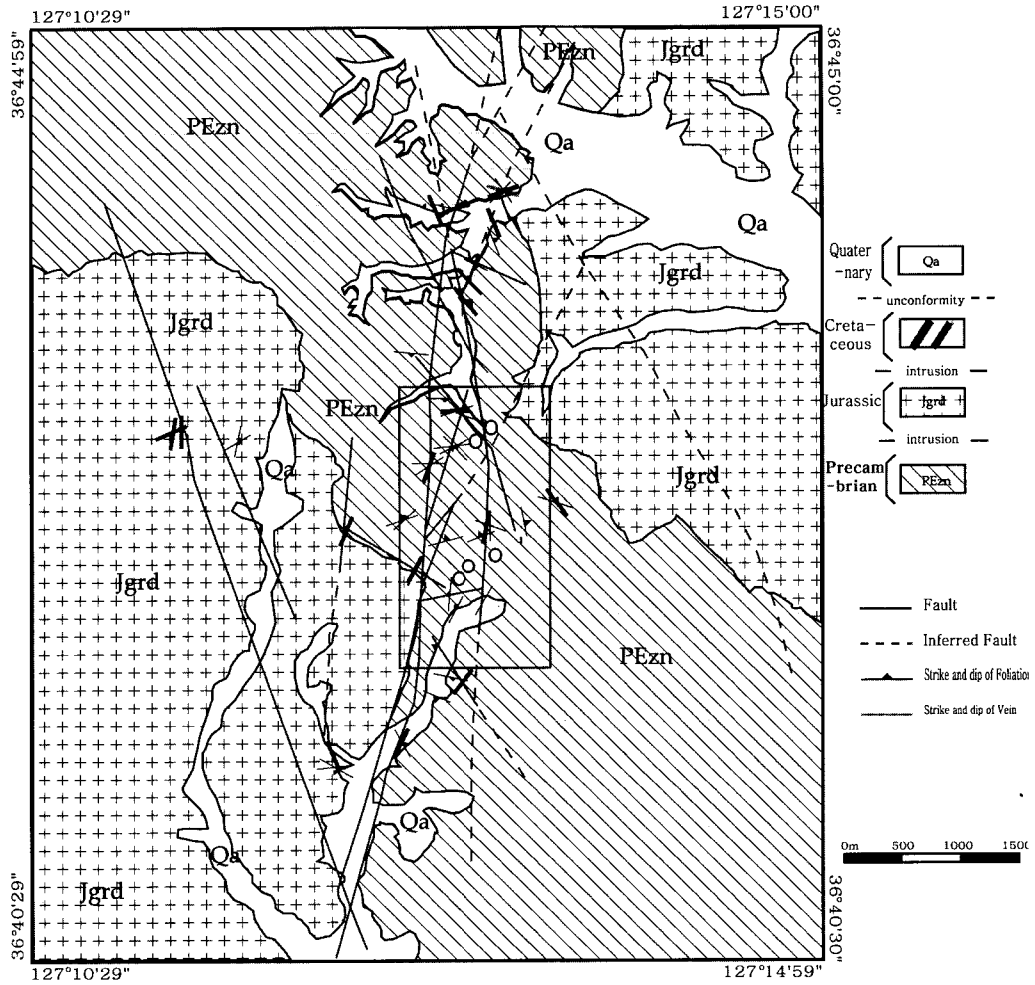


Fig. 2. Geology of the study area.

역할을 하고 있다.

N20°E의 주향을 갖는 추가령단층대의 R-, Y- 전단단층들은 조구조적 규모이며, 이 전단단층들은 충상단층이 재 활동된 주향이동성 단층이거나, 역단층을 겪은 후의 정단층으로 분류된다. 연구 지역내에는 추가령단층대의 R-, Y- 전단단층들 중 N18°E 주향의 대규모 충상단층 한 조각 연구 지역의 주 계곡선을 통과하고 있으며 이 충상단층에 수반된 NS 주향의 또 다른 충상단층과 N20°W의 전단단층이 발달하고 있다.

지하수 유동과 관련된 지질구조적 규제조건을

보면 1) 조구조적 규모를 갖는 충상단층대의 주향과 경사는 N18°E/60°NW이며 단층의 폭은 약 3m이다. 2) 충상단층대를 채운 단층각력암은 대수층 역할을 하고 있으며, 단층각력암의 아래와 위의 지층은 대수층에 지하수를 공급하는 누수층의 역할을 하고 있다. 3) 대수층의 형태는 예각의 부채꼴 모양을 나타내며, 이는 N18°E 주향의 충상단층과 NS 주향의 또 다른 충상단층에 의해서 규제된다. 4) 습곡운동에 수반된 충상단층은 충상단층상반과 하반에 각각 배사형과 향사형의 습곡구조를 형성하고 있다. 이를 기하학적으로 보면, 충상

여러 가지 양수시험분석방법 적용을 통한 목천지역 암반대수층의 수리지질학적 특성

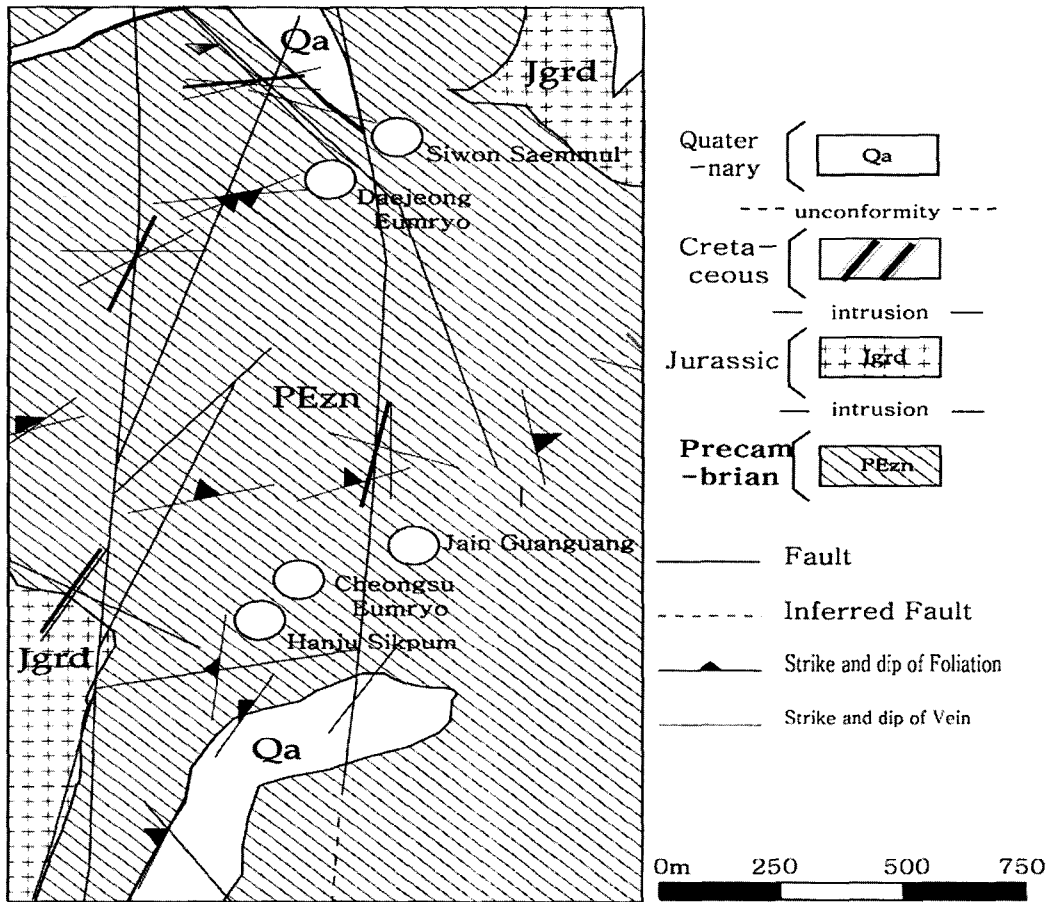


Fig. 3. Geology around the five natural mineral-water companies.

단층 상반부근에 발달된 배사형 습곡구조내에서는 천부보다는 심부에 소량의 지하수가 부존되어 있을 것으로 판단된다. 반면에 층상단층 하반의 향사형 습곡구조내에서는 천부에서 심부까지 대수층이 발달할 수 있는 지질구조를 갖고 있다.

양수시험분석의 배경

양수시험분석은 대수층의 수리상수를 산출하는 목적 이외에도 대수층의 수직적, 수평적인 규모와 대수층의 형태에 관한 정보를 제공할 수 있다. 그러나 지질학적인 정보가 부족한 상태에서 양수시험분석을 행할 때는 어떤 모델이 현장조건에 가

장 잘 맞는지를 결정하기가 어렵다. 특히, 암반대수층에는 2차원 방사상 모델인 Theis 식이 잘 들어맞지 않는 경우가 많은데 이는 지하수 흐름이 균열이나 단층의 발달상태에 지배를 받기 때문이다. 결정질암으로 되어 있는 암반대수층에서 지하수 유동을 지배하는 중요한 인자는 불연속면(단층, 균열)의 연장, 빈도, 연결성, 교차성, 방향성, 경사, 불연속면의 성질(간극의 변화 정도, 거칠기, 충전물질 등) 등이다. 그러므로 지질구조적 정보를 알고 있을 때는 현장 조건에 적합한 모델을 선정하기가 쉬우며, 계산된 수리상수도 실제에 가깝다.

균열암반내 지하수 흐름에 대한 접근방법에는

균열암반을 연속체로 보는 경우와 불연속체로 보는 경우가 있다. 균열암반을 연속체로 보면 그 암반은 수리지질학적으로 균등하면서 다공질로 해석할 수 있다. 이와 반대로 불연속체로 보면 지하수 흐름은 여러 조의 균열을 따라서 일어나며, 개개 균열의 연장, 방향성, 경사, 빈도, 균열면의 성질뿐만 아니라 균열과 균열간의 연결성과 교차성이 지하수 흐름을 좌우할 것이다. 기존의 양수시험분석모델은 모두 연속체 모델로서 해석학적 모델이다. 일반적으로 양수시험분석에 이용되는 식에는 Theis(1935), Papadopolos-Cooper(1967), Hantush(1960, 1962), Hantush-Jacob(1955), Moench(1985), Neuman-Witherspoon(1969), Gringarten-Witherspoon(1969), Gringarten-Ramey(1974) 식 등이 있다.

Theis(1935) 식은 등방성이고 균질한 완전 피압대수층을 관통한 양수정을 통하여 지하수를 양수할 때 적용되는 식이다. Papadopolos-Cooper(1967) 식은 완전 피압대수층 내에 개발된 양수정의 공경이 클 경우의 양수시험 해석식이다. Hantush-Jacob(1955) 식은 누수피압대수층에서 양수정을 통하여 지하수를 양수할 때 적용하는 식이다. 이때 누수층의 저류성은 0으로 가정한다. Hantush(1960)는 준대수층(누수층)의 저류성이 있다고 가정할 때 누수피압대수층에서의 양수시험 해석식을 제안하였다. Moench(1985)는 우물손실과 우물저장 효과를 고려하는 누수피압대수층의 양수시험 해석식을 제안하였다. 이때, 준대수층(누수층)은 대수층의 아래와 위에 위치하고 있으며 누수층의 저류계수가 고려된다. 또한, 상, 하의 준대수층이 일정수두경계를 가지는 경우(Case 1), 상, 하의 준대수층이 불투수경계를 가지는 경우(Case 2), 그리고 상부 준대수층이 일정수두경계, 하부 준대수층이 불투수경계를 가지는 경우(Case 3)로 나누었다. Neuman-Witherspoon(1969)은 준대수층에 의해 분리되어 있는 두 대수층으로 구성되는 피압대수층계로부터 양수할 때의 지하수 흐름을 해석하였다. 가정으로는 양수정은 두 대수층 중 하나의 대수층만을 완전 관통하고 있으며, 준대수층내의 저류계수를 고려한다. 또한 양수를 하지 않는 대수층에서의 수두강하를 고려한다. Gringarten과 Witherspoon(1972)은 유한한 길이의

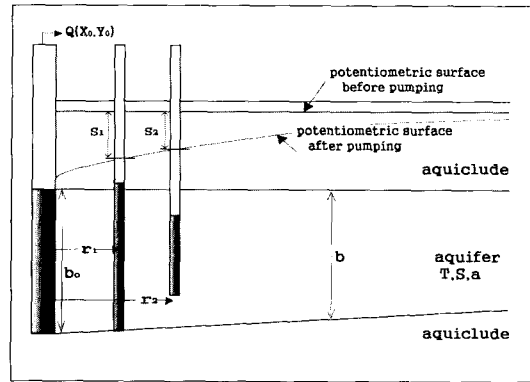


Fig. 4. Schematic presentation of Hantush (1962)'s wedge-shaped confined aquifer (HydroSOLVE, 2000).

수직균열이 피압대수층을 관통하고 있는 경우에 수직균열의 중앙부에 위치하는 양수정으로부터 양수할 때의 수위하강식을 제안하였다. Gringarten과 Ramey(1974)는 피압대수층내에 유한한 범위의 원판상 수평균열이 존재할 때 수평균열의 중심에 위치하는 양수정으로부터 양수할 때의 수위하강식을 제안하였다.

Hantush(1962)는 쉘기형 피압대수층 내에 굴착된 양수정으로부터 지하수를 양수할 때 수위하강식을 제안하였다. 쉘기형 피압대수층 모델(Fig. 4)은 본 연구지역에 가장 적합한 모델로 파악되는데 이에 대해서는 뒷 장에 현장 적용 결과가 제시된다. 쉘기형 피압대수층 모델은 대수층이 피압대수층이며, 무한히 뻗어 있으며 균질하고 등방성이라고 가정한다. 또한 양수정으로서의 지하수 흐름은 수평이고, 대수층의 두께는 지하수 흐름 방향으로 지수적인 변화를 하며 흐름방향에 따른 대수층의 두께 변화율은 $0.2 (=11.3^\circ)$ 보다 작다. 양수정의 영향권은 피압층 최대경사의 접선이 0.2보다 큰 지역까지 미치지 못한다. 쉘기형 피압대수층의 기저면의 경사는 x-방향으로 지수적으로 변화하며, y-방향으로는 일정하다. Hantush (1962)에 의한 쉘기형 피압대수층의 부정류 흐름은

$$s = \left\{ \frac{Q}{4\pi k b_0} \exp\left(\frac{r}{a} \cos \theta\right) \right\} W\left(u, \left|\frac{r}{a}\right|\right) \quad (1)$$

여러 가지 양수시험분석방법 적용을 통한 목천지역 암반대수층의 수리지질학적 특성

Table 2. Details of the pumping and observation wells of the five natural mineral-water companies.

Company	Well ID	X (UTM)	Y (UTM)	Z (m)	Well Depth (m)	Well Casing (m)	Well dia. (m)	DTW	Alluvium thick. (m)	Thick. of Weathered zone (m)	Bedrock thick. (m)
Siwon Saemmul	PW-1	340783	4064998	119.760	107.0	33.50	0.25	14.80	4.3	7.7	95.0
	PW-2	340811	4064960	123.250	175.0	38.15	0.25	17.90	3.2	7.3	164.5
	OW-1	340843	4064969	117.940	60.0	7.00	0.15	13.75	3.6	3.4	53.0
	OW-2	340802	4064965	123.790	50.0	6.70	0.15	16.26	2.4	4.3	43.3
	OW-3	340803	4065000	117.960	60.0	10.50	0.15	14.90	3.7	6.8	49.2
	OW-4	340820	4064970	122.380	60.0	9.60	0.15	18.40	2.8	6.8	50.4
	OW-5	340812	4064903	124.840	60.0	5.60	0.15	16.70	2.2	3.4	54.4
	OW-6	340867	4064943	121.940	60.0	6.80	0.15	17.88	2.0	6.8	21.2
	OW-7	340870	4064914	117.450	66.0	11.80	0.15	14.90	4.3	7.5	54.2
	OW-8	340871	4064878	124.830	100.0	8.00	0.15	15.95	2.1	5.9	92.0
Daejeong Eumryo	PW-1	340587	4064924	135.257	229.9	24.00	0.25	9.10	6.0	18.0	205.9
	PW-2	340638	4064842	136.870	203.0	28.40	0.25	9.10	6.0	22.4	174.6
	PW-3	340406	4064412	172.760	229.9	28.60	0.25	55.66	4.0	23.0	202.9
	PW-4	340802	4064883	119.140	113.1	131.10	0.25	16.50	7.5	19.0	86.6
	OW-1	340559	4064894	139.170	90.0	1.80	0.15	1.06	6.0	15.1	78.9
	OW-2	340603	4064811	136.080	180.0	5.70	0.15	5.10	5.0	19.0	156.0
	OW-3	340644	4064949	135.310	230.0	29.50	0.25	5.41	8.0	19.0	203.0
	OW-4	340592	4064798	135.070	180.0	30.00	0.15	3.55	8.0	18.0	154.0
	OW-5	340554	4064894	135.890	180.0	30.00	0.15	5.34	8.0	18.0	154.0
	OW-6	340784	4064918	131.810	200.0	103.00	0.15	10.23	6.0	23.0	201.0
	OW-7	340421	4064391	172.200	200.0	11.50	0.15	60.75	5.0	20.0	175.0
	OW-8	340395	4064398	173.030	130.0	5.70	0.15	55.84	4.0	18.0	128.0
OW-9	340457	4064385	164.300	100.0	11.00	0.15	4.30	4.0	6.0	90.0	

강래수, 함세영, 최성자, 이병대

Table 2. Continued.

Company	Well ID	X (UTM)	Y (UTM)	Z (m)	Well Depth (m)	Well Casing (m)	Well dia. (m)	DTW	Alluvium thick. (m)	Thick. of Weathered zone (m)	Bedrock thick. (m)
Jain Guanguang	PW-1	340725	4064017	150.17	222.0	23.7	0.25	12.30	7.0	25.0	210
	PW-2	340574	4063799	150.21	184.5	29.2	0.25	19.00	6.0	12.5	155.3
	OW-1	340778	4064076	133.36	150.0	12.0	0.15	24.60	5	5.6	138.4
	OW-2	340560	4064085	126.31	145.0	12.0	0.15	17.00	5	6.2	133.8
	OW-3	340573	4064285	130.06	135.0	12.0	0.15	22.80	1.8	4.0	124.2
	OW-4	340570	4064079	150.43	70.0	15.0	0.15	2.00	5	6.5	58.5
	OW-5	340555	4064063	145.37	150.0	15.0	0.15	8.40	5	6.5	123.5
	OW-6	340592	4063804	151.00	152.2	13.7	0.15	10.10	5.6	10.4	136.3
	OW-7	340579	4063803	150.10	150.0	15.0	0.15	10.10	5.5	12.0	132.5
	OW-8	340566	4063799	145.50	145.5	15.0	0.15	9.98	5.5	11.0	129.0
OW-9	340575	4063788	130.00	130.0	14.0	0.15	11.12	6.0	13.0	111.0	
Cheongsu Eumryo	PW-1	340207	4063695	133.31	150.0	24.0	0.25	11.60	3.2	16.3	130.5
	PW-2	340157	4063725	140.43	200.0	16.4	0.25	15.00	3.8	24.8	171.4
	PW-3	340155	4063642	135.16	180.0	29.2	0.25	10.60	3.0	15.9	161.1
	OW-1	340024	4063685	132.91	180.0	17.0	0.15	14.63	3.2	13.3	163.5
	OW-2	340156	4063645	148.87	150.0	12.0	0.15	11.02	2.8	4.3	142.9
	OW-3	340207	4063690	132.16	150.0	24.0	0.15	12.30	3.8	6.4	139.8
	OW-4	340054	4063829	169.35	150.0	13.6	0.15	12.57	5.4	8.2	136.2
	OW-5	340155	4063638	134.86	70.0	7.3	0.20	10.29	3.6	3.7	62.7
	OW-6	340160	4063627	134.24	70.0	18.0	0.20	10.06	3.5	4.1	62.4
	OW-7	340194	4063675	132.16	150.0	24.0	0.15	9.14	3.3	12.9	133.8
Hanju Sikpum	PW-1	340036	4063517	126.48	204.0	17.6	0.25	10.60	5.0	8.5	190.5
	PW-2	340071	4063501	119.47	203.0	17.3	0.25	3.90	6.7	10.1	186.2
	OW-1	340013	4063532	126.78	140.0	8.0	0.15	9.50	0.5	4.3	135.2
	OW-2	340017	4063529	126.63	30.0	6.7	0.075	6.70	0.9	4.6	24.5
	OW-3	340067	4063599	126.19	140.0	10.6	0.15	8.20	3.4	5.2	131.4
	OW-4	340073	4063510	119.64	110.0	15.0	0.20	3.80	2.4	4.4	103.2
	OW-5	340139	4063494	118.40	140.0	10.0	0.15	4.10	3.6	5.9	130.5

와 같다. 여기서, Q 는 양수량, r 은 양수정과 관측 정간의 거리, b_0 은 양수정이 위치하는 곳의 대수층의 두께, 경사각(θ)은 양수정과 관측정을 잇는 선과 x -방향이 이루는 각도(라디안)이고, a 는 쉐기형 피압대수층의 지수적인 두께변화를 나타내는 상수이다. 그리고 $u = r^2 S / (4kb_0 t)$ 이다.

양수시험 분석의 적용

연구지역내에는 5개 먹는샘물 제조업체(시원샘물, 대정음료, 자인관광, 청수음료, 한주식품)이 있으며, 각 업체의 양수시험자료((주)동서엔지니어링, 1995a, 1995b, 1996a, 1996b, 1996c, 1996d, 1996e, 1997a, 1997b, 1999a, 1999b, 2001a, 2201b; (주)지암엔지니어링, 2000)를 해석하였다. 각 업체별 취수정과 감시정에 대한 자세한 사항은 Table 2와 같다.

시원샘물

시원샘물은 대정음료와 함께 태호고개의 북측에 위치하는 먹는샘물 제조업체이다. 두 업체간의 거리는 동-서 방향으로 약 200m이고, 691번 지방도를 중심으로 동쪽에는 시원샘물, 그리고 서쪽에는 대정음료가 위치하고 있다. 이 두 업체 모두 두 조의 충상단층 내에 위치하고 있으며, 두 업체를 가로지르는 691번 지방도는 충상단층에서 파생된 소단층의 충적층을 지나가고 있다. 시원샘물에는 2개의 양수정(SWPW-1, SWPW-2)과 5개의 감시정(SWOW-2, SWOW-4, SWOW-5, SWOW-6, SWOW-8호정)이 있다(Fig. 5). 양수시험은 SWPW-1호정과 SWPW-2호정에서 개별적으로 실시하였다. SWPW-1에서 양수시 감시정 SWOW-2, SWOW-5에서 수위하강을 관측하였다. 양수정과 감시정간의 거리는 각각 8.0m, 54.0m이다. SWPW-1, SWOW-2, SWOW-5의 초기 수위는 각각 지표하 14.8m, 14.9m, 16.7m 이다. 양수량은 83 m³/day, 양수시간은 8,600분, 양수 후의 회복수위 측정시간은 1,400분이다. 양수경과 8,600분일 때 SWPW-1호공에서 수위강하는 51.71m(지표하 66.51m)이고, 이때 SWOW-2, SWOW-5의 수위강하는 각각 3.07m, 0.45m이다.

SWPW-2에서의 양수시 감시정 SWOW-4, SWOW-6, SWOW-8에서 수위변화를 관측하였다. 양수정과 감시정간의 공간 거리는 각각 9.0m, 6.3m, 57.5m이다. SWPW-2, SWOW-4, SWOW-6, SWOW-8의 초기수위는 각각 지표하 17.9m, 18.4m, 17.88m, 15.95m이다. SWPW-2의 양수량은 166m³/day이고, 양수시간과 회복수위 측정시간은 각각 8,600분과 1,400분이다. 양수경과 8,600분일 때 SWPW-2의 수위강하는 56.26m(지표하 74.16m)이고, 감시정 SWOW-4, SWOW-6, SWOW-8의 수위강하는 각각 6.59m(지표하 24.99m), 5.38m(지표하 23.26m), 0.70m(지표하 16.65m)이다.

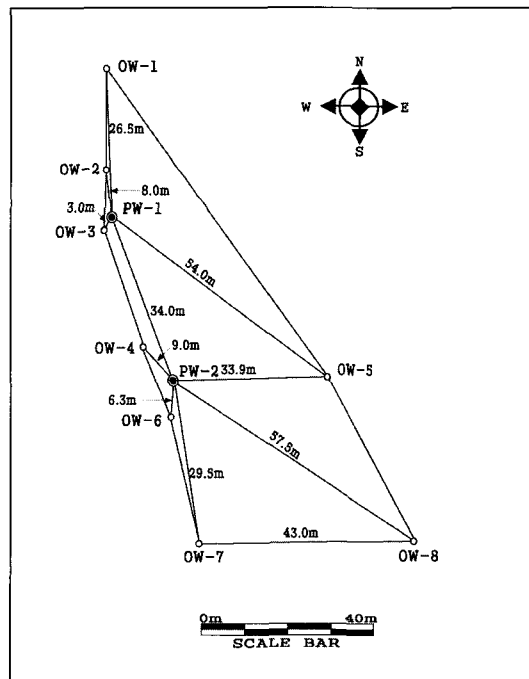


Fig. 5. Distribution of pumping and observation wells of Siwon Saemmul company.

양수시험분석을 위해서는 Theis(1935), Hantush (1960, 1962), Hantush-Jacob(1955), Moench (1985), Neuman-Witherspoon(1969), Gringarten-Witherspoon(1969), Gringarten-Ramey(1974) 모델을 적용하였다. 각각의 모델에 대해서 수위측정

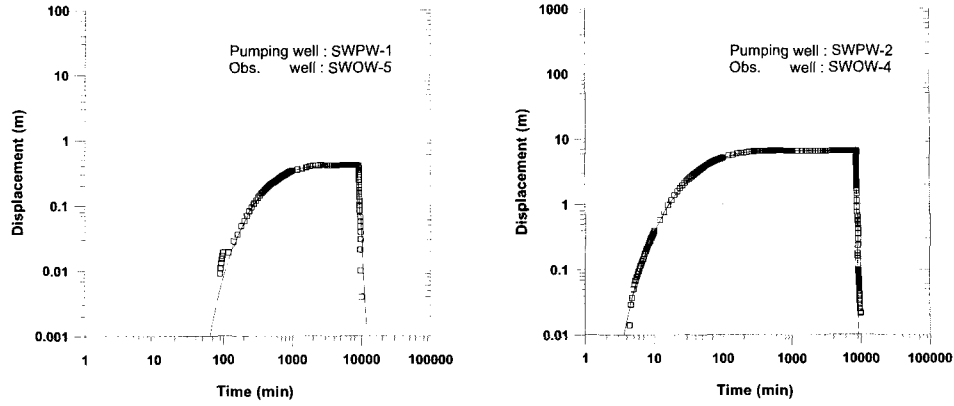


Fig. 6. Curve-fitting results of pumping test at Siwon Saemmul company.

Table 3. Residual sum of squares (RSS) from different pumping test methods.

Pumped well	Observ. well	Theis (1935)	Hantush-Jacob (1955)	Hantush (1960)	Hantush (1962)	Moench Case 1 (1985)	Neuman-Witherspoon (1969)	Gringarten-Witherspoon (1972)	Gringarten-Ramey (1974)
SWPW-1	SWOW-2	67.90	8.59	52.10	8.59	8.71	9.38	67.90	68.00
	SWOW-5	0.64	0.23	0.56	0.23	0.24	0.24	0.67	0.68
SWPW-2	SWOW-4	532.50	3.86	396.00	3.86	8.37	396.00	533.00	534.00
	SWOW-6	184.00	30.10	133.00	30.10	37.50	34.40	190.00	191.00
	SWOW-8	7.40	3.68	6.46	3.68	11.90	3.68	7.40	7.40

Table 4. Calculated hydraulic constants at Siwon Saemmul company.

ID	PW	OW	Aquifer model	T (m ² /sec)	S
SW	1	2	Hantush's wedge-shaped confined aquifer	4.26E-05	1.40E-02
	1	5	Hantush's wedge-shaped confined aquifer	2.22E-04	2.08E-02
	2	4	Hantush's wedge-shaped confined aquifer	3.81E-05	8.24E-03
	2	6	Hantush's wedge-shaped confined aquifer	8.23E-05	8.09E-03
	2	8	Hantush's wedge-shaped confined aquifer	2.47E-04	9.21E-03

값과 이론곡선의 일치 정도를 비교하기 위하여 잔차 제곱의 합(RSS, residual sum of squares)를 구하였다(Table 3). Hantush(1962)의 쉐기형 피압

대수층과 Hantush-Jacob(1955)의 누수대수층 모델의 잔차 제곱의 합이 서로 같은 값을 보이면서 수위측정 자료에 가장 잘 일치하는 것으로 나타

여러 가지 양수시험분석방법 적용을 통한 목천지역 암반대수층의 수리지질학적 특성

났다. 그러나, 연구지역의 층상단층 구조와 연관시켜 보았을 때, Hantush(1962)의 썸기형 피압대수층 모델이 가장 적합한 것으로 나타난다. 양수시험분석결과 중에서 SWPW-1 호정 양수시 SWOW-5호정에서 수위관측 결과와, SWPW-2 호정 양수시 SWOW-4호정에서의 수위관측값과 이론곡선은 Fig. 6에 제시되어 있다. 계산된 투수량계수는 $3.81 \times 10^{-5} \sim 2.47 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{sec}$ 이며, 평균값은 $1.26 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{sec}$, 중간값은 $8.234 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{sec}$ 이다(Table 4). 한편 저류계수는 $8.24 \times 10^{-3} \sim 2.08 \times 10^{-2}$ 범위를 가지며, 평균값은 1.23×10^{-2} , 중간값은 9.21×10^{-3} 이다. 저류계수값이 암반대수층의 일반적인 저류계수보다 크게 나타나는 것은 기반암의 풍화대의 영향을 받음을 지시하는 것으로 해석된다.

대정음료

대정음료는 시원샘물과 함께 태호고개의 복층에 위치하고 있다. 대정음료에는 4개의 취수정(DJPW-1, DJPW-2, DJPW-3, DJPW-4), 6개의 감시정(DJOW-2, DJOW-4, DJOW-6, DJOW-7, DJOW-8, DJOW-9)이 있다. 그러나 DJPW-2호정의 경우에는 허가량이 작은 관계로 사용을 하지 않고 있는 상태이다. 양수시험은 DJPW-1과 DJPW-3에서 개별적으로 실시하였다.

양수정 DJPW-1에서 양수시 감시정 DJOW-2, DJOW-4, DJOW-6에서 수위변화를 관측하였다. DJPW-1, DJOW-2, DJOW-4, DJOW-6의 최초수위는 각각 지표하 9.10m, 5.10m, 3.55m, 10.23m이다. 양수량은 230m³/day이며, 양수시간은 8,600분 그리고 양수 후의 회복수위 관측시간은 1,400분이

다. 양수경과 8,600분일 때 DJPW-1, DJOW-2, DJOW-4, DJOW-6의 수위강하는 각각 139.25m(지표하 148.35m), 17.20m(지표하 22.30m), 0.86m(지표하 4.41m), 8.85m(지표하 19.08m)이다.

양수정 DJPW-3에서 양수시 감시정 DJOW-7, DJOW-8, DJOW-9에서 수위변화를 관측하였다. DJPW-3, DJOW-7, DJOW-8, DJOW-9의 초기수위는 각각 지표하 55.66m, 60.75m, 55.84m, 4.30m이다. 양수량은 193m³/day이었으며, 양수시간은 7,200분, 양수 후 수위회복 관측시간은 1,500분이다. 양수경과 7,200분일 때, DJPW-3, DJOW-7, DJOW-8, DJOW-9에서의 수위강하는 각각 36.51m(지표하 92.17m), 14.52m(지표하 75.27m), 19.53m(75.37m), 0.45m(지표하 4.75m)이다.

양수시험분석결과 대부분의 시험공에서 Hantush(1962)의 썸기형 피압대수층 모델이 수위 측정값과 가장 잘 일치하는 것으로 나타났으며, 양수정 DJPW-1에서 양수시 감시정 DJOW-6에서는 Moench(1985)의 우물손실과 우물저장효과를 고려하는 누수피압대수층의 양수시험해석식(Case 1)이 수위 측정값에 가장 잘 일치하는 것으로 나타났다. 측정된 투수량계수는 $2.87 \times 10^{-6} \sim 5.59 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{sec}$ 이고, 평균값은 $1.24 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{sec}$, 중간값은 $4.85 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{sec}$ 이다(Table 5). 저류계수는 $3.40 \times 10^{-5} \sim 9.18 \times 10^{-4}$ 이고 평균값은 5.91×10^{-4} , 중간값은 8.09×10^{-4} 이다.

자인관광

자인관광은 태호고개를 기준으로 하여 남측에 위치하고 있으며, 691번 도로를 기준으로 하여 우

Table 5. Calculated hydraulic constants at Daejeong Eumryo company.

ID	PW	OW	Aquifer model	T (m ² /sec)	S
DJ	1	4	Hantush's wedge-shaped confined aquifer	5.59E-04	7.70E-04
	1	6	Moench's leaky confined aquifer (Case 1)	2.87E-06	3.40E-05
	3	5	Hantush's wedge-shaped confined aquifer	3.01E-05	8.47E-04
	3	7	Hantush's wedge-shaped confined aquifer	5.47E-05	9.18E-04
	3	8	Hantush's wedge-shaped confined aquifer	5.46E-05	8.47E-04

측에 있으며, 정면으로 600m 지점에 청수음료와 마주보고 있다. 자인관광에는 2개소의 취수정(JIPW-1, JIPW-2)과 9개소의 감시정(JIOW-1, JIOW-2, JIOW-3, JIOW-4, JIOW-5, JIOW-6, JIOW-7, JIOW-8, JIOW-9)이 있다.

본 지역에는 자인관광의 양수시험자료가 불충분하여 자인관광의 이전 업체인 "목천탄산수 신정음료"의 양수시험자료를 이용하여 양수시험분석을 실시하였다. 양수시험은 JIPW-1과 JIPW-2에서 개별적으로 실시하였다.

JIPW-1에서 양수시에는 감시정 JIOW-1, JIOW-2, JIOW-3에서 수위관측을 실시하였다. JIPW-1의 양수량은 558m³/day이며, 양수시간은 8,640분간, 양수 후 회복수위 관측은 1,440분간 실시하였다. JIPW-1, JIOW-1, JIOW-2, JIOW-3의 최초수위는 각각 지표하 19.0m, 18.8m, 18.8m, 16.6m이다. JIPW-1, JIOW-1, JIOW-2, JIOW-3의 양수 경과시간 8,640분의 수위강하는 45.05m(지표하 64.05m), 23.75m(지표하 42.55m), 21.71m(지표하 40.51m), 11.96m(지표하 28.46m)이다.

JIPW-2에서 양수시에는 감시정 JIOW-6과 JIOW-7에서 수위변화를 관측하였다. 양수량은 363m³/day, 양수시간은 8,640분, 회복수위 관측시간은 1,440분이다. JIPW-2, JIOW-6, JIOW-7의 최초수위는 모두 지표하 10.10m로서 동일하다. 양수 경과 8,640분일 때의 JIPW-2, JIOW-6, JIOW-7의 수위하강은 각각 32.73m(지표하 42.83m), 16.83m(지표하 26.93m), 23.43m(지표하 33.53m)이다.

양수시험분석결과 JIPW-1에서 양수시 감시정 JIOW-1에서의 수위변화는 Hantush(1962)의 쉐기형 피압대수층에 가장 잘 맞는 것으로 나타났으

며, JIPW-1에서 양수시 감시정 JIOW-2, JIOW-3 그리고 JIPW-2에서 양수시 JIOW-6, JIOW-7에서의 수위변화 자료는 Moench(1985)의 우물손실과 우물저장효과를 고려하는 누수피압대수층의 양수 시험해석식(Case 1이 수위 측정값에 가장 잘 맞는 것으로 나타났다.

계산된 투수량계수는 $2.03 \times 10^{-5} \sim 8.74 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{sec}$ 이고, 평균값은 $6.72 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{sec}$, 중간값은 $8.70 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{sec}$ 이다(Table 6). 한편 저류계수는 $1.43 \times 10^{-6} \sim 4.51 \times 10^{-3}$, 평균값은 9.67×10^{-4} , 중간값은 2.161×10^{-5} 이다.

청수음료

청수음료는 태호고개의 남측부에 위치하고 있으며, 동쪽으로 600m 지점에는 자인관광이, 남서쪽으로 250m 지점에는 한주식품이 위치하고 있다. 청수음료에는 취수정 3개소(CSPW-1, CSPW-2, CSPW-3), 감시정 7개소(CSOW-1, CSOW-2, CSOW-3, CSOW-4, CSOW-5, CSOW-6, CSOW-7)가 있다. 청수음료에서는 CSPW-1, CSPW-2, CSPW-3에서 개별적으로 양수시험을 실시하였다.

CSPW-1에서는 단공양수시험을 실시하였으며, 양수량은 508m³/day, 양수시간은 8,600분, 회복수위 관측시간은 1,400분이다. CSPW-1의 초기수위는 지표하 11.60m이고, 양수경과 8,600분일 때 수위강하는 58.60m(지표하 70.20m)이다.

CSPW-2에서 양수시에는 CSPW-1, CSOW-2, CSPW-4에서 수위를 관측하였다. CSPW-2와 감시정의 거리는 각각 62.9m, 74m, 104m이다. CSPW-2, CSPW-1, CSOW-2, CSPW-4의 초기 수위는 각각 지표하 15.00m, 11.60m, 11.02m,

Table 6. Calculated hydraulic constants at Jain Guanguang company.

ID	PW	OW	Aquifer model	T (m ² /sec)	S
JI	1	1	Hantush's wedge-shaped confined aquifer	8.70E-05	4.51E-03
	1	2	Moench's leaky confined aquifer (Case 1)	8.71E-05	1.29E-05
	1	3	Moench's leaky confined aquifer (Case 1)	5.44E-05	2.84E-04
	2	6	Moench's leaky confined aquifer (Case 1)	8.74E-05	2.16E-05
	2	7	Moench's leaky confined aquifer (Case 1)	2.03E-05	1.43E-06

여러 가지 양수시험분석방법 적용을 통한 목천지역 암반대수층의 수리지질학적 특성

12.57m이다. 양수량은 890m³/day이고, 양수시간은 8.600분이며, 회복수위 관측시간은 1.400분이다. 양수경과 8.600분일 때 CSPW-2, CSPW-1, CSOW-2, CSPW-4에서의 수위강하는 각각 53.03m(지표하 68.03m), 4.98m(지표하 16.58m), 0.68m(지표하 11.70m), 0.23m(지표하 12.80m)이다.

CSPW-3에서 양수시에는 CSOW-2, CSOW-3에서 수위를 관측하였다. 양수량은 910m³/day이고, 양수시간은 8.600분이며, 회복수위 관측시간은 1.400분이다. CSPW-3과 CSOW-2, CSOW-3과의 거리는 각각 21.3m, 108.1m이다. CSPW-3, CSOW-2, CSOW-3의 초기수위는 각각 지표하 10.60m, 11.02m, 12.30m이다. CSPW-3, CSOW-2, CSOW-3의 양수경과 8.600분의 수위강하는 각각 26.64m(지표하 37.24m), 5.91m(지표하 16.93m), 1.32m(지표하 13.62m)이다.

양수시험분석결과 Hantush(1962)의 썰기형 피압대수층식이 수위 측정값에 가장 잘 일치하는 것으로 나타났다. 계산된 투수량계수는 $5.30 \times 10^{-5} \sim 4.03 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$, 평균값은 $9.64 \times$

$10^{-4} \text{ m}^2/\text{sec}$, 중간값은 $2.11 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{sec}$ 이다(Table 7). 저류계수는 $4.52 \times 10^{-4} \sim 2.38 \times 10^{-2}$ 이다.

한주식품

한주식품은 태호고개 북측에 위치하며, 북동쪽 250m 지점에 청수음료가 위치하고 있다. 한주식품에는 취수정 2개소(HJPW-1, HJPW-2)와 감시정 5개소(HJOW-1, HJOW-2, HJOW-3, HJOW-4, HJOW-5)가 있다.

HJPW-1에서 양수하고 HJOW-1, HJOW-2, HJOW-3, HJOW-4에서 수위변화를 관측하였다. HJPW-1에서의 양수량은 229m³/day, 양수시간은 8.600분간, 양수 후 수위회복 관측시간은 1.400분이다. HJPW-1, HJOW-1, HJOW-2, HJOW-3, HJOW-4의 초기수위는 각각 지표하 10.60m, 9.50m, 6.70m, 8.20m, 3.81m이다. 양수경과 8.600분일 때의 수위강하는 HJPW-1, HJOW-1, HJOW-2, HJOW-3, HJOW-4에서 각각 55.80m(지표하 66.40m), 10.13m(지표하 19.63m), 20.83m(지표하 14.13m), 10.21m(지표하 2.01m), 8.11m(지표하 4.30m)이다.

Table 7. Calculated hydraulic constants at Cheongsu Eumryo company.

ID	PW	OW	Aquifer model	T (m ² /sec)	S
CS	1	PW-1	Hantush's wedge-shaped confined aquifer	5.30E-05	
	2	PW-2	Hantush's wedge-shaped confined aquifer	5.85E-05	
	3	PW-3	Hantush's wedge-shaped confined aquifer	2.11E-04	
	3	3	Hantush's wedge-shaped confined aquifer	4.03E-03	2.38E-02
	3	2	Hantush's wedge-shaped confined aquifer	4.65E-04	4.52E-04

Table 8. Calculated hydraulic constants at Hanju Sikpum company.

ID	PW	OW	Aquifer model	T (m ² /sec)	S
HJ	1	1	Hantush's wedge-shaped confined aquifer	1.89E-05	4.41E-06
	1	2	Hantush's wedge-shaped confined aquifer	4.07E-03	1.10E-01
	1	3	Hantush's wedge-shaped confined aquifer	6.29E-02	5.16E-02
	1	4	Hantush's wedge-shaped confined aquifer	1.63E-04	
	2	PW-2	Hantush's wedge-shaped confined aquifer	2.12E-05	

HJPW-2의 양수시에는 양수정에서 수위하강을 관측하였다. 양수량은 287 m³/day, 양수시간은 8.600분이며, 수위회복 관측시간은 1400분이다. HJPW-2의 초기수위는 지표하 3.90m이며, 양수경과 8.600분시 수위강하는 65.50m(지표하 69.40m)이다.

양수시험분석결과 Hantush(1962)의 썩기형 피압대수층식이 수위 측정값과 가장 잘 일치하는 것으로 나타났다. 계산된 투수량계수는 $1.89 \times 10^{-5} \sim 6.29 \times 10^{-2} \text{m}^2/\text{sec}$, 평균값은 $1.34 \times 10^{-2} \text{m}^2/\text{sec}$, 중간값은 $1.63 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{sec}$ 이고, 저류계수는 $4.41 \times 10^{-6} \sim 0.11$ 이다(Table 8). HJOW4의 저류계수값은 비현실적으로 작게 나타나므로 Table 8에서 제외하였다. 이와 같이 저류계수값의 범위가 큰 것은 대수층의 저류성의 불균질하다는 것을 의미한다.

토의 및 결론

연구지역의 먹는샘물 취수정들은 선캠브리아기 편마암내에 위치하고 있고, 조구조적인 두 조의 층상단층(각각 N18E와 NS 방향으로 달리고 있음)이 지나고 있는 주변 또는 층상단층에서 파생된 소단층, 소습곡의 향사축 내에 위치하고 있다. 양수시험해석 모델에 의하면 썩기형 피압대수층 모델(Hantush, 1962)이 가장 적합하며, 취수정의 위치에 따라 우물손실 및 우물저장효과를 고려하는 누수피압대수층 Case 1 모델(Moench, 1985)도 적합한 것으로 나타나고 있다.

태호고개 북쪽에 위치하는 시원샘물과 대정음료의 취수정과 감시정들은 두 조의 층상단층 내에 위치하고 있으며, 태호고개의 남쪽에 위치하는 자인관광의 취수정과 감시정들 역시 두 조의 층상단층 내부에 위치하고 있다. 따라서, 이들 취수정과 감시정들이 위치한 곳은 썩기형 피압대수층 모델(Hantush, 1962)이나 우물손실 및 우물저장효과를 고려하는 누수피압대수층 Case 1 모델(Moench, 1985)에 적합한 것으로 나타난다. 위치에 따라 Hantush(1962) 모델과 Moench(1985) 모델이 달리 나타나는 이유는 이들 공들이 두 조의 층상단층 사이에 있다 하더라도 상부 층상단층의

영향을 직접적으로 받지 않는 곳에 위치하는 공은 Hantush(1962) 모델에 적합한 것으로 나타나고, 두 조의 층상단층의 영향을 모두 받는 곳에 위치하는 공들은 Moench(1985) 모델에 적합한 것으로 나타난다. 그러나, 한주식품과 청수음료의 취수정과 감시정들은 N18E 주향의 층상단층의 상반에 위치하고 있어서 모든 공들이 썩기형 피압대수층 모델(Hantush, 1962)에 적합한 것으로 나타난다. 따라서, 양수시험해석모델은 지질구조와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

대수층의 규모와 수리상수를 연계하여 해석하면, 자인관광 주변 대수층은 누수피압대수층 Case 1 모델(Moench, 1985)에 적합하며, 대수층의 규모가 작고 따라서 저류계수의 평균값도 낮게 나타난다. 이에 대해서 시원샘물과 대정음료의 취수정과 감시정들은 DJOW-6를 제외하고는 썩기형 피압대수층 모델에 적합한 것으로 나타나며, 이는 이들 공들이 두 조의 층상단층 사이에 있더라도 상, 하부 대수층경계의 영향을 크게 받지 않음을 의미한다. 또한 대수층의 규모도 자인관광 주변의 대수층보다는 큰 것으로 보이며, 저류계수의 평균값도 자인관광보다는 크다. 청수음료와 한주식품 주변의 대수층은 N18E 주향의 층상단층의 상반에 위치하고 있어서 전형적인 썩기형 피압대수층의 형태를 보인다. 또한 대수층의 규모도 가장 크고, 저류계수의 평균값도 자인관광, 시원샘물, 대정음료의 취수정과 감시정들보다 크게 나타난다. 앞으로 5개 먹는샘물 제조업체에서 안정적으로 먹는샘물을 생산하기 위해서는, 시원샘물과 대정음료는 두 조의 층상단층 사이에 위치고 대체로 동일 대수층내에 속하므로 취수정들간의 영향을 항상 감시하여야 한다. 자인관광은 두 조의 층상단층 사이에 위치하고 다른 업체와는 분리되어 있으나, 대수층의 규모가 작아서 장기적으로 다량의 먹는샘물을 양수하면 대수층이 고갈될 위험성이 있는 것으로 해석된다. 한주식품과 청수음료의 취수정들은 상부 층상단층의 상반의 전형적인 썩기형 피압대수층내에 위치하고 있는 것으로 해석된다. 따라서, 대수층의 규모가 다른 업체들에 비해서 크고 저류성도 더 큰 것으로 판단된다.

위에서 알 수 있는 바와 같이, 양수시험분석을 지질구조와 연계하여 실시하면, 대수층의 수리적

성질뿐만 아니라 대수층의 형태, 규모 등에 관해서 보다 상세한 정보를 얻을 수 있다. 특히, 암반대수층에서 지하수를 개발할 때는 지질구조에 관한 정확한 자료를 획득하는 것이 매우 중요함을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- 정찬호, 정기영, 1999, 경북 청송지역 달기 탄산약수의 지화학적 수질특성과 생성기원, 자원환경지질, 32권, 455-468.
- (주)동서엔지니어링, 1995a, (주)성남음료 먹는샘물환경영향조사서.
- (주)동서엔지니어링, 1995b, (주)한주식품 먹는샘물환경영향조사서.
- (주)동서엔지니어링, 1996a, (주)빙천 먹는샘물환경영향조사서.
- (주)동서엔지니어링, 1996b, (주)빙천 먹는샘물환경영향조사서(보완).
- (주)동서엔지니어링, 1996c, (주)전의음료 먹는샘물환경영향조사서.
- (주)동서엔지니어링, 1996d, (주)한주식품 먹는샘물환경영향조사서.
- (주)동서엔지니어링, 1996e, (주)한주식품 먹는샘물환경영향조사서(보완).
- (주)동서엔지니어링, 1997a, (주)목천산업개발 먹는샘물환경영향조사서.
- (주)동서엔지니어링, 1997b, (주)전의음료 먹는샘물환경영향조사서(종합).
- (주)동서엔지니어링, 1999a, (주)신송산업 먹는샘물환경영향조사서(연장허가).
- (주)동서엔지니어링, 1999b, (주)명수?물 먹는샘물환경영향조사서(연장허가).
- (주)동서엔지니어링, 2001a, (주)대정 먹는샘물환경영향조사서.
- (주)동서엔지니어링, 2001b, (주)자인관광 먹는샘물환경영향조사서.
- (주)지암엔지니어링, 2000, (주)자인관광 먹는샘물환경영향조사서(연장허가).
- Gringarten, A.C. and Witherspoon, P.A., 1972, A method of analyzing pump test data from fractured aquifers, Int. Soc. Rock Mechanics and Int. Assoc. Eng. Geol., Proc. Symp. Rock Mechanics, Stuttgart, v. 3-B, 1-9.
- Gringarten, A.C. and Ramey, H.J., 1974, Unsteady state pressure distributions created by a well with a single horizontal fracture, partial penetration or restricted entry, Soc. Petro. Engrs. J., 413-426.
- Hantush, M.S. and Jacob, C.E., 1955, Non-steady radial flow in an infinite leaky aquifer, Am. Geophys. Union Trans., v. 36, 95-100.
- Hantush, M.S., 1960, Modification of the theory of leaky aquifers, Jour. of Geophy. Res., v. 65, n. 11, 3713-3725.
- Hantush, M.S., 1962, Flow of groundwater in sands of nonuniform thickness: 3. Flow to wells, Jour. Geophys. Res., v. 67, n. 4, 1537-1534.
- HydroSOLVE, Inc., 2000, User's Guide, 164p.
- Moench, A.F., 1985, Transient flow to a large-diameter well in an aquifer with storative semiconfining layers, Water Resources Research, v. 21, n. 8, 1121-1131.
- Neuman, S.P. and Witherspoon, P.A., 1969, Theory of flow in a confined two aquifer system, Water Resources Research, v. 5, n. 4, 803-816.
- Papadopulos, I.S. and Cooper, H.H., 1967, Drawdown in a well of large diameter, Water Resources Research, v. 3, 241-244.
- Theis, C.V., 1935, The lowering of the piezometer surface and the rate and discharge of a well using groundwater storage, Transaction, American Geophysical Union, v. 16, 519-524.

투 고 일	2003년 1월 10일
심 사 일	2003년 1월 11일
심사완료일	2003년 2월 24일

강래수, 함세영, 최성자, 이병대

강래수

부산대학교 지질학과

609-735 부산광역시 금정구 장전동 산 30번지

Tel: 051-510-3451

e-mail: atlas21c@pusan.ac.kr

함세영

부산대학교 지질학과

609-735 부산광역시 금정구 장전동 산 30번지

Tel: 051-510-2252

e-mail: hsy@pusan.ac.kr

최성자

한국지질자원연구원 지질연구부

305-350 대전광역시 유성구 가정동 산 30번지

Tel: 042-868-3034

e-mail: sjchoi@kigam.re.kr

이병대

한국지질자원연구원 환경지질연구부

305-350 대전광역시 유성구 가정동 산 30번지

Tel: 042-868-3088

e-mail: blee@kigam.re.kr