

덕산온천 지역의 수리적 성질

Hydraulic Properties of Duksan Hot-spring Area

함 세 영 (Se-Yeong Hamm)

부산대학교 지구환경시스템과학부

조 병 옥 (Byong Wook Cho)

한국자원연구소 지구환경연구부

성 익 환 (Ig Hwan Sung)

한국자원연구소 지구환경연구부

요 약/ABSTRACT

본 연구는 덕산온천내에 수행된 28개 양수시험자료를 종합하여 덕산온천의 수리적 특성 및 매개변수를 파악하였다. 프락탈 모델, 누수성 프락탈 모델 그리고 정상류의 이중공극 프락탈 모델을 이용한 양수시험분석 결과, 대체로 온천의 중심부에서는 1.9 또는 2.0의 유동차원을 보이며, 주변부에서는 1.5~1.7의 유동차원을 보인다. 2.0차원의 경우에, 투수량계수와 대수층 손실에 의한 산출계수의 상관성이 총 수위강하를 이용한 비양수량의 상관성보다 훨씬 높게 나타난다. 그러나, 1.9차원의 경우에는 일반화 투수량계수와 산출계수간의 상관성이 일반화 투수량계수와 비양수량간의 상관성과 비슷하게 나타나며 상관계수도 높게 나타난다.

주요어 : 덕산온천, 일반화 투수량계수, 산출계수, 비양수량, 프락탈 모델

The pumping test analysis on 28 pumping test data in Duksan hot-spring area was performed using the fractal model, the leaky fractal model, and the steady-state dual-porosity fractal model. The fractional flow dimension 1.9 or 2.0 was determined in the central part of the hot spring and the fractional flow dimension 1.5-1.7 in the marginal area. For the flow dimension 2.0, the correlation between the transmissivity and the productivity index by the aquifer loss was much better than that between the transmissivity and the specific yield by the total drawdown. On the other hand, for the flow dimension 1.9, the correlation between the generalized transmissivity and the productivity index was very similar to that between the generalized transmissivity and the specific yield.

Key words : Duksan hot-spring, generalized transmissivity, productivity index, specific yield, fractal model

서 론

덕산온천은 이미 수백년전부터 알려져 왔으며 신증동국여지승람에도 덕산온천을 기록하고 있다(내무부, 1983). 덕산온천의 수온은 30-48°C로서 우리 나라 온천 중 온도가 높은 편이다. 일제시대인 1917년경부터 덕산온천에 대한 관심이 높아지면서 1920년에 개발이 시작되었다. 그러나, 본격적인 시추는 1945년 이후 1960년대부터였다. 그 뒤에도 덕산온천지역에서는 많은 온천공이 개발되었으며(Fig. 1), 지금까지 덕산온천지역의 온천공 탐사 및 개발과 관련된 다수의 지질학적 연구(신병우 외, 1989), 지구물리학적 연구(서만철·이기화, 1981; 정봉일·이기화, 1981), 수리지질학적 연구(임정웅 외, 1987; 임정웅 외, 1988a; 임정웅 외, 1988b; 임정웅 외, 1989; 임정웅 외, 1990a; 임정웅 외, 1990b; 임정웅 외, 1990c; 임정웅 외, 1991; 조병욱, 배두중, 1992; 조병욱외, 1993)가 있었다. 그러나, 이들 조사·연구의 대부분은 개발 대상 온천공만에 국한되었으므로 덕산온천의 전체적인 수리지질학적인 특성을 파악하는데는 어려움이 있었다.

본 연구는 현재까지의 양수시험, 지질조사, 지구물리탐사, 시추자료를 종합하여, 충남 예산군 덕산면 시랑리, 사동리 및 신평리의 덕산온천 일대의 수리지적 매개변수를 알아내고 아울러서 일반화 투수량계수와 산출계수 및 비양수량의 관련성을 정립하기 위한 것이다. 양수시험분석은 양수시험정의 위치에 따라 덕산원탕 온천공(4223b공)의 남부와 북부로 구분하고, 북부는 다시 북서부와 북동부지역으로 구분하였다. 이는 덕산원탕을 중심으로 위치에 따른 수리지적 성질을 파악하기 위한 것이다. 양수시험공의 번호는 미국 지질조사소의 번호 매김법을 이용하였다.

양수시험에 이용된 모델은 프락탈 모델(Barker, 1988), 누수성 프락탈 모델(Hamm and Bidaux, 1994a)과 정상류의 이중공극 프락탈 모델(Hamm and Bidaux, 1994b)이었다. 지하수 유동의 프락탈 모델은 분할 유동차원을 도입하여 균열암반내에서 지하수의 주요한 통로가 되는 균열대에 관한 정보를 제공하므로, 기존 이중공극 모델들(Barenblatt et al., 1960; Warren and Root, 1963; Boulton, and Streltsova, 1977; Kazemi, 1969; Moench, 1984)이

나 방사상 흐름 모델(Theis, 1935), 누수성 모델(Hantush, 1956, 1960)보다 균열암반 대수층에 대한 적용성이 뛰어나다. 프락탈 모델들에 의해서 구할 수 있는 수리상수는 K (대수층 또는 균열의 수리전도도, LT^{-1}), S_s (대수층 또는 균열의 비저유율, L^{-1}), b (지하수의 흐름에 연직방향의 대수층 또는 균열의 범위, L), K' (누수층 또는 불록의 수리전도도, LT^{-1}), S_s' (누수층 또는 불록의 비저유율, L^{-1}), W_s (양수정의 우물저장계수, L^2), s_f (양수정의 우물손실계수, 무차원), B (누수층의 누수계수, L) 그리고 n (분할유동차원)이다. K 와 b , K' 와 b' , S_s 와 b , S_s' 와 b' 는 상호 관련성을 가지며 또한 각각의 값을 구하기가 쉽지 않다. 따라서, Kb^{3-n} (일반화 투수량계수), $K'b^{3-n}$, $S_s b^{3-n}$ (일반화 저류계수), $S_s' b'^{3-n}$ 로 묶어서 표현하는 것이 더 효율적이다. 만약 정확한 수리전도도값(K)을 알 수 있다면 지하수의 흐름에 연직방향의 대수층 또는 균열의 범위(b)도 결정될 수 있을 것이다. 그러나, 프락탈 대수층에서 b 값을 아는 것은 K 값을 아는 것보다 훨씬 더 어렵다.

지질, 지질구조 및 수리지질

덕산온천의 지질은 쥐라기 대보화강암으로 이루어져 있다(Fig. 2). 정봉일과 이기화(1981)에 의하면, 덕산과 읍내리를 연결하는 45번 국도(N50E방향)를 경계로 북쪽에는 세립질 각섬석 화강암 그리고 남쪽에는 조립질 흑운모 화강암이 분포한다. 그러나, 신병우 외(1989)는 본 지역 전체를 흑운모화강암으로 기재하였다. 북서쪽의 원효봉과 남쪽의 수암산 사이의 온천들에서는 이와 같이 대보화강암 위에 두께 4m 정도의 층적층이 덮고 있다.

이 지역에서는 여러 방향($N8^{\circ}-10^{\circ}E$, $75^{\circ}-90^{\circ}SE$; $N10^{\circ}-40^{\circ}E$, $70^{\circ}-90^{\circ}SE$; $N40^{\circ}-80^{\circ}W$; $40^{\circ}-80^{\circ}SW$)의 절리가 발달되어 있으며, 특히, 우세한 절리의 주향은 $N0^{\circ}-60^{\circ}E$, 경사는 남동쪽이고, 그 다음은 주향 $N20^{\circ}-80^{\circ}W$, 경사는 남서쪽이다(정봉일·이기화, 1981). 서만철·이기화(1981)에 의하면, 주요 단층의 주향과 경사는 각각 $N3^{\circ}E$, $80^{\circ}SE$ 및 $N80^{\circ}E$, $45^{\circ}NW$ 그리고 $N10^{\circ}W$, $80^{\circ}SW$ 이며 가장 우세한 절리의 주향과 경사는 각각 $N3^{\circ}-15^{\circ}E$ 와 $80^{\circ}SE$ -수직이다. 덕산온천 지역의 전기탐사 결과에 의하면(서만철·이

덕산온천 지역의 수리적 성질

기화, 1981), 주향 N5°-10°E, 남동경사의 이상대와 주향 N80°W, 거의 수직의 이상대가 낮은 전기비저항값을 나타내었으며, 이 방향은 주 단층 및 절리의 방향과 잘 일치하고 있다. 따라서, 서만철·이기화(1981)는 N5°-10°E방향과 N80°W방향이 온천수

(지열수)의 상승 통로와 관련되는 것으로 보았다.

시추공 지질을 보면, 4233b공의 심도는 350m이고(Table 1), 247m까지는 충격식 시추로 굴진하여 코어가 회수되지 않았으므로 지질을 정확히 알 수 없다. 그러나, 247-328m사이 는 각섬석화강암으로

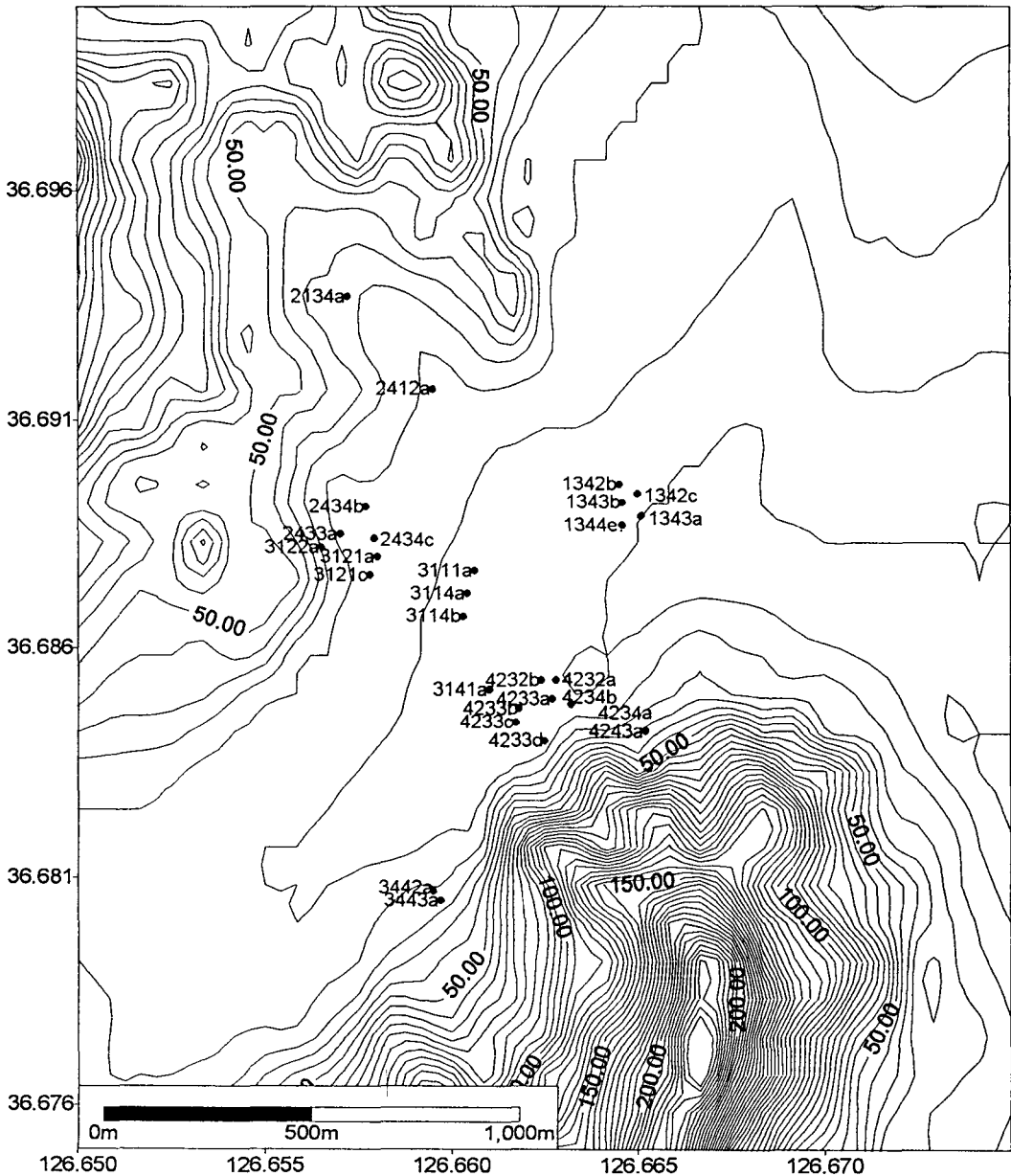


Fig. 1. Location of test holes in Duksan hot-spring area.

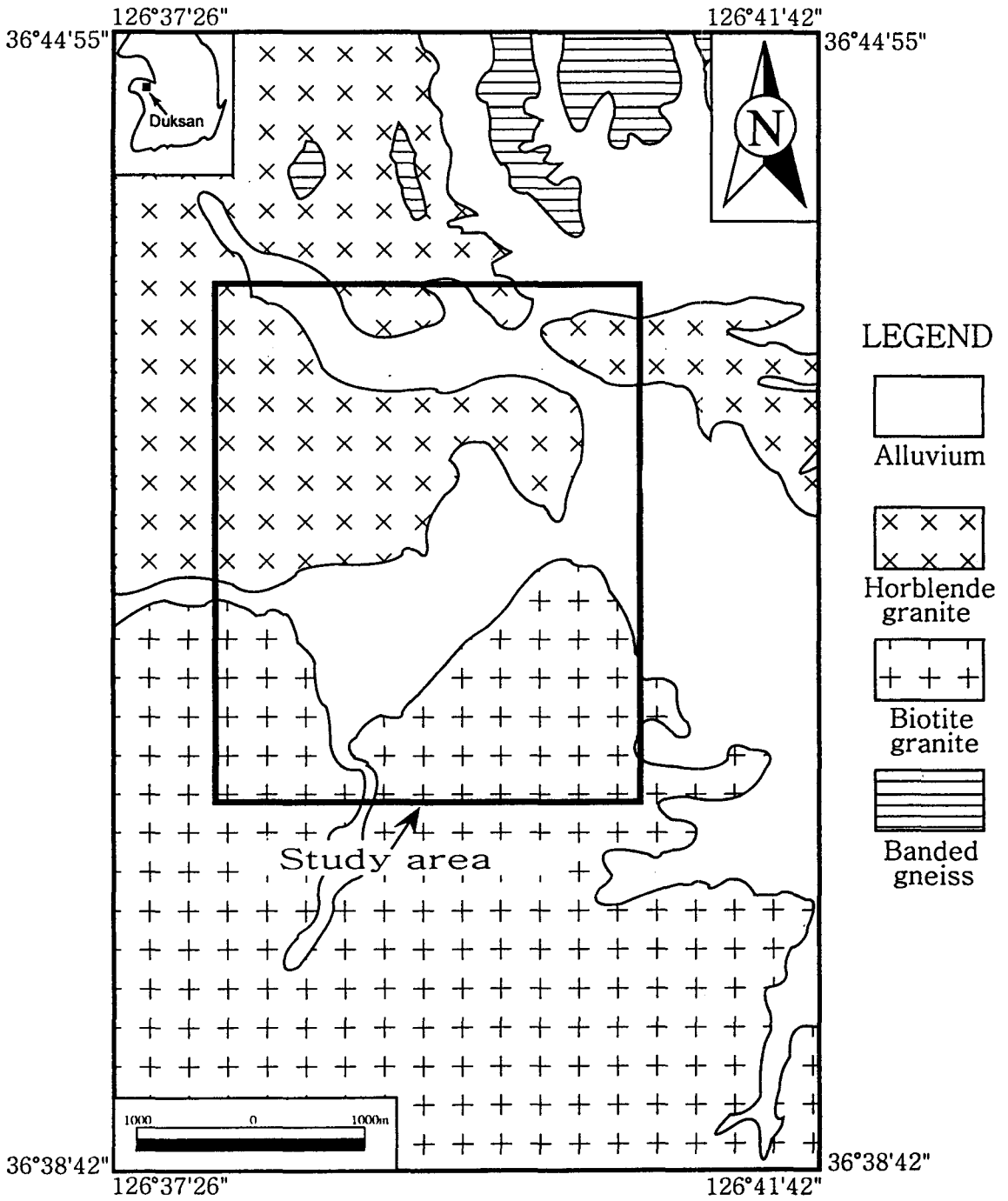


Fig. 2. Geological map of Duksan hot-spring area.

덕산온천 지역의 수리적 성질

Table 1. Description of test holes

Location	Hole no.	Longitude Latitude	Hole dia. (inch)	Hole depth(m)	Casing	Depth to water(m)
Southern area	4233a	126° 39' 46" 36° 41' 5.6"	8	300	0-150m	1.85
	4234a	126° 39' 50.1" 36° 41' 5"	8	350	0-180m	0.42
	4234b	126° 39' 47.8" 36° 41' 5.6"	8	408	0-244m	1.90
	3442a	126° 39' 35.6" 36° 40' 50"	8-6.5	370	0-54m	2.96
	3443a	126° 39' 35.4" 36° 40' 49.5"	8	400	?	2.26
	4233b	126° 39' 43" 36° 41' 5.2"	6-3	350	0-127m	1.54
	4232b	126° 39' 44.9" 36° 41' 7"	3	250	0m	1.21
	4223b	126° 39' 42.6" 36° 41' 11.1"	8	300	?	?
	4232a	126° 39' 46.3" 36° 41' 7.1"	8	345	0-185m	0.80
	4233c	126° 39' 42.7" 36° 41' 3.8"	8	348	0-318m	2.80
	4233d	126° 39' 45" 36° 41' 2.4"	8	333	0-130m	2.50
	3141a	126° 39' 39.1" 36° 41' 6.7"	8	345	0-125m	3.40
	North- western area	3114a	126° 39' 37.3" 36° 41' 13.7"	8	313	0-170m
3114b		126° 39' 37" 36° 41' 12.2"	8	284	0-150m	3.41
3111a		126° 39' 38.8" 36° 41' 16.1"	8	362	0-277m	3.50
2434b		126° 39' 27.6" 36° 41' 20.8"	8	600	0-373m	12.62
2434c		126° 39' 28.5" 36° 41' 18.4"	8	579	0-264m	13.49
3121a		126° 39' 28.4" 36° 41' 16.6"	8	590	0-280m	13.46
3122a		126° 39' 23.5" 36° 41' 16.8"	8	600	?	6.72
2433a		126° 39' 25.7" 36° 41' 18.5"	8	600	0-225m	4.25
North- eastern area	1343a	126° 39' 55.2" 36° 41' 20.7"	8	630	0-350m	13.30
	1343b	126° 39' 52.9" 36° 41' 21.7"	8	610	0-355m	10.77
	1342b	126° 39' 53" 36° 41' 23.2"	8	526	0-302m	13.38
	1343e	126° 39' 53.1" 36° 41' 19.5"	8	660	0-300m	12.10
	1342c	126° 39' 55" 36° 41' 22"	8	450	0-200m	8.35

되어 있으며 이 구간이 대수층 역할을 하고 있는 것으로 보인다. 이 구간의 파쇄 정도는 심하며 파쇄면을 따라서는 1-5mm두께의 산화철이 나타나고 있다(임정웅 외, 1987). 328-350m구간은 흑운모화강암으로 되어 있으며, 이 구간에도 파쇄대가 심하게 발달되어 있고 파쇄면 사이는 단층점토 및 단층각력으로 채워져 있다. 따라서, 328-350m구간도 대수층 역할을 할 수 있는 것으로 보인다.

4232b공은 4233b공으로부터 72.5m 떨어져 있으며, 심도는 250m이다. 이 공은 NQ(75mm)의 공경을 가진다. 심도별 지질을 보면, 11m까지는 충적층 및 잔류토로 되어 있으며, 11-64m 구간은 흑운모화강암으로 되어 있고 대부분이 심하게 파쇄되어 있으며 파쇄면 사이는 단층각력과 단층점토로 채워져 있다(임정웅 외, 1987).

지질 및 구조지질에 의하면, 온천수(지열수)는 남북 내지 북북동-남남서 방향의 거의 수직의 구조대(균열대, 단층대, 파쇄대)를 따라서 상승하고 있는 것으로 판단된다.

수위하강곡선 분석

프락탈 모델은 기존의 이중공극 모델, 누수 대수층 모델, 방사상 흐름 모델과는 달리 분할 유동차원을 도입함으로써 지하수 흐름의 통로가 되는 균열의 프락탈 기하를 표현할 수 있다. 따라서, 분할 유동차원은 프락탈 대수층에서 가장 먼저 결정되어야 하는 요소이다. 분할 유동차원은 양대수방안지상에 수위하강곡선을 도시하였을 때, 양수 후기단계의 수위하강곡선의 기울기로부터 알 수 있다. 여기서, 양수후기 단계란 양수정의 경우에는 우물저장효과가 사라진 시기로서 수위하강값이 직선상으로 나타나는 단계이다.

이중공극 모델인 경우에는 전이상태를 벗어나서 블록과 균열이 하나의 통합된 시스템으로 거동하는 단계의 기울기이다. 이 단계에는 수위하강값이 직선상 또는 거의 직선상으로 배열하게 된다. 수위하강곡선의 기울기(ν)는 $1-n/2\alpha$ 와 같다. 그러나, 이론적인 기울기를 얻기 위해서는 양수시간이 상당히 길어야 하지만 보통의 경우에는 양수시간이 그에 미치지 못한다. 따라서, 일반적으로 분할 유동차원에

대한 기울기(ν)는 이론적인 값보다 더 크게 나타난다. 특히, 분할 유동차원이 1.5차원을 넘어서 2.0차원에 가까워질수록 이런 현상은 더 현저하다. 보통의 경우에 적용할 수 있는 기울기(ν)와 분할 유동차원(n)의 관계식은

$$\nu = 2.30386 - 4.27226 n + 6.30127 n^2 - 7.62231 n^3 + 3.44171 n^4 \quad (1)$$

과 같다.

누수성 대수층인 경우에는 본격적인 누수현상이 나타나기 이전에 대수층 자체로부터 지하수 공급이 일어나는 단계의 기울기를 이용하여 분할 유동차원을 결정하여야 하나 정상적인 프락탈 모델(Barker, 1988)이나 이중공극 프락탈 대수층보다는 분할 유동차원 결정이 어렵다. 특히, 누수율이 커질수록 분할 유동차원 결정은 더 어려워지게 된다.

양수시험분석

남부지역

남부지역은 덕산원탕 온천공(4223b공)의 남쪽에 해당하는 지역으로 임정웅 외(1987), 임정웅 외(1988a), 임정웅 외(1988b), 임정웅 외(1989), 임정웅 외(1990a), 임정웅 외(1990b)에 의해서 양수시험이 수행된 지역이다. 먼저, 4234b공(임정웅 외(1990a)의 D11호공임)을 양수정으로 하고 4233a공(임정웅 외(1990b)의 D12호공임)을 관측정으로 한 양수시험 분석결과에 의하면, 누수성 프락탈 대수층 (Hamm and Bidaux, 1994a)의 양상을 보이며(Fig. 3), 4234b공과 4233a공의 분할 유동차원은 1.9차원을 나타낸다(Table 2). 누수계수 B는 4234b공이 40.0m 그리고 4233a공은 76.9m로서 4234b공의 누수율이 더 크게 나타난다. 한편, 4233a공을 양수정으로 하고 4234b공을 관측정으로 한 양수시험 분석결과(Fig. 3)에서는 누수계수 B는 4233a공의 누수계수 B가 100.0m 그리고 4234b공은 76.9m로서 4234b공의 누수율이 더 크게 나타난다. 관측정 4233a공의 Kb^{3-n} 과 $S_s b^{3-n}$ 은 양수정으로서의 4233a공의 수리상수보다 크게 나타나며, 관측정 4234b공에서의 수리상수도 양수정으로서의 4234b공의 수리상수보다 크게 나타나고 있다.

3141a공(임정웅 외(1989)의 D8호공), 4232a공(임

덕산온천 지역의 수리적 성질

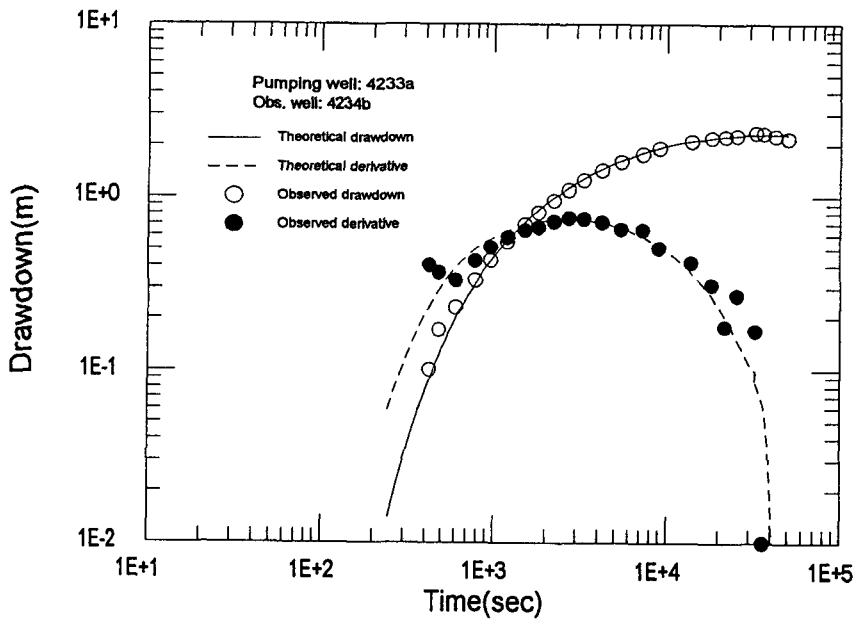
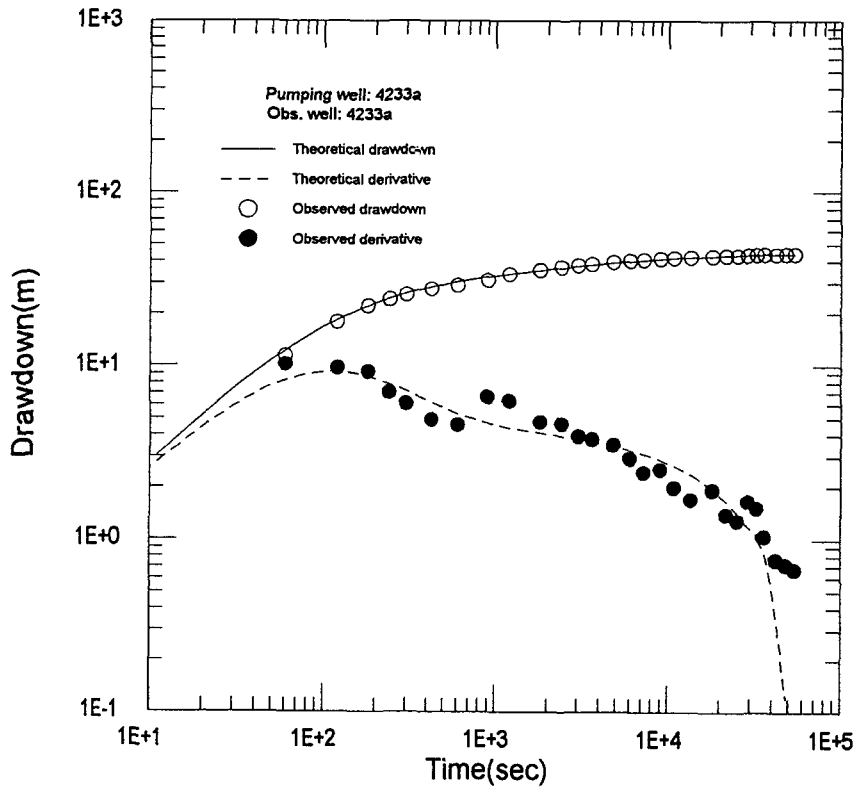


Fig. 3. Analysis of pumping test at holes 4233a, 4234b, 3442a and 3443a in the southern part of Duksan hot-spring area.

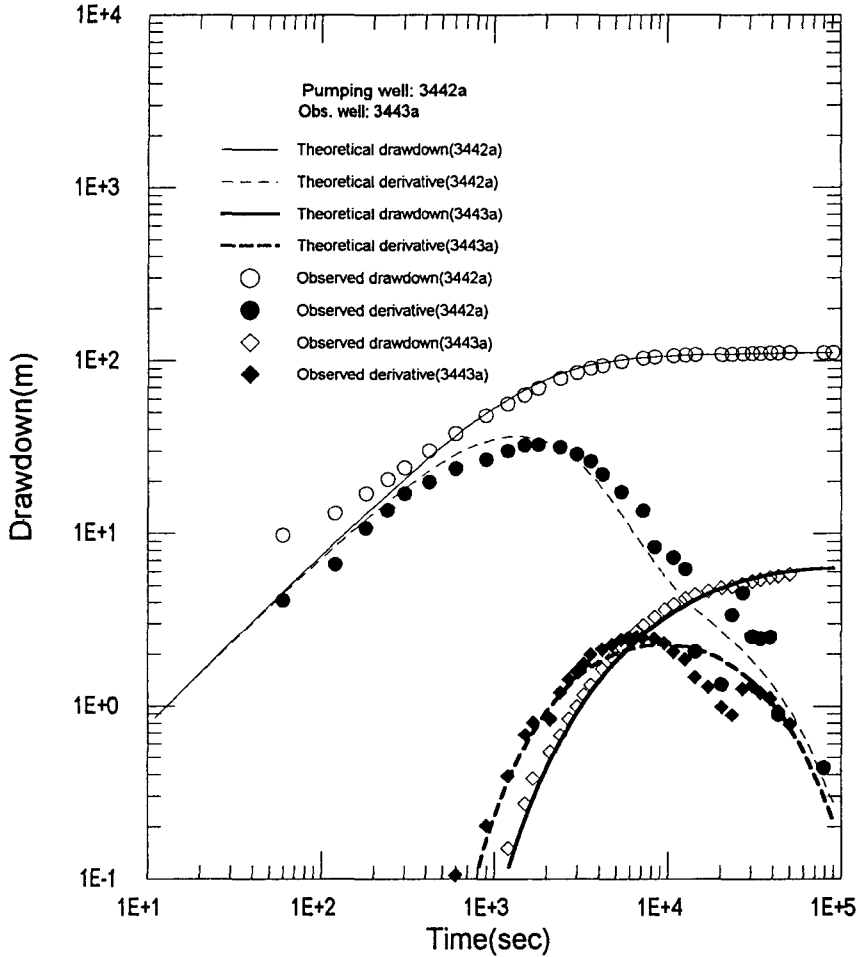


Fig. 3. (Continued)

정웅 외(1989)의 D9호공, 4233c공(임정웅 외(1989)의 D10호공)의 양수시험에서는, 덕산 원탕(4223b공)에서 온천수를 양수하고 있었으므로 덕산 원탕의 양수영향을 고려하여 양수시험 분석을 하였다. 4223b공의 온천수 양수량은 170m³/day로 하였다. 양수시험 분석결과에 의하면, 누수성 프락탈 대수층(Hamm and Bidaux, 1994a)의 양상을 보이며, 4232a공은 1.9차원, 3141a공은 1.7차원 그리고 4233c공은 1.5차원의 분할 유동차원을 나타낸다(Table 2). 그러나, 누수성은 4233c공이 가장 크고(33.3m), 3141a공(200.0m), 4232a공(250.0m)의 순으로 나타난다.

4234a공(임정웅 외(1988b)의 D6호공)의 양수시험 자료의 분석결과에 의하면, 누수성 대수층(Hamm and Bidaux, 1994a)의 수위하강 특성을 보이며, 분할 유동차원은 1.9로 나타낸다(Table 2). 또한 누수계수는 76.9m로서 다른 공들과 비교할 때 누수성이 중간정도이다.

3442a공(임정웅 외(1988b)의 D7호공)과 3443a공(임정웅 외(1988b)의 D7-1호공)은 연구지역 중 가장 남쪽에 위치하고 있다(Fig. 1). 양수시험시 3442a공은 양수정 그리고 3443a공은 관측정으로 이용되었다. 양수시험 분석(Fig. 3)에 의하면, 분할 유동차원이 2.0으로서 누수성 대수층의 양상을 보인

다. 이때 누수계수는 143.0m로서 누수성이 약간 낮은 편이다. 특징적인 사실은 양수정(3442a공)과 관측정(3443a공)간의 지형상의 거리는 23.8m이나, 수리적인 연결성에 의한 거리는 89.0m로 나타난다는 것이다. 이는 지하수 흐름의 통로가 꾸불꾸불하므로 지형상의 거리보다 길어지는 것으로 판단된다(Fig. 4).

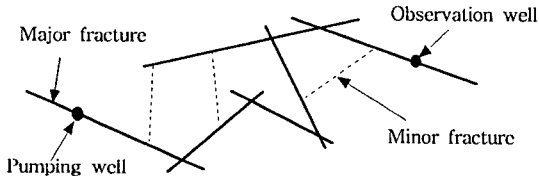


Fig. 4. Flow path in fissured aquifer.

임정웅 외(1987)에 의해서 수행된 양수시험에서는 4233b공(임정웅 외(1987)의 D1호공)이 양수정 그리고 4232b공(임정웅 외(1987)의 D2호공)이 관측정으로 이용되었다. 양수시험 분석결과에 의하면, 누수성 프락탈 대수층(Hamm and Bidaux, 1994a)의 양상을 보이며, 분할 유동차원은 1.9로 나타난다(Table 2). 덕산 원탕(4223b공)의 온천수 사용량(200m³/day)과 4233b공의 수위하강 관측값을 이용하여 양수시험 분석을 한 결과, 프락탈 대수층의 특성을 나타내었으며, 분할 유동차원은 1.6으로 결정되었다.

4233d호공은 양수정인 동시에 관측정으로 이용되었다(임정웅 외, 1988a). 양수시험 분석결과에 의하면, 누수성 프락탈 대수층(Hamm and Bidaux, 1994a)의 양상을 보이며, 분할 유동차원은 1.9로 나타난다(Table 2).

북부 지역

북서부지역

북서부지역은 원탕 온천공(4223b공)의 북서쪽에 해당하는 지역으로 임정웅 외(1988b), 조병욱 외(1993)에 의해서 양수시험이 수행된 지역이다. 임정웅 외(1988b)에 의해서 수행된 양수시험자료의 분석에 의하면, 3114a공(임정웅 외(1988b)의 D3호공)과 3114b공(임정웅 외(1988b)의 D4호공)의 분할 유

동차원은 2.0이다(Table 2). 3111a공(임정웅 외(1988b)의 D5호공)의 분할 유동차원은 1.9차원으로 3114a공과 3114b공보다 약간 작다. 또한 수위하강곡선의 형태를 보면(Fig. 5), 3114a공과 3111a공은 누수성 대수층의 특성을 보이나, 3114b공은 정상류의 이중공극 대수층의 특성을 보인다. 3114b공의 수위하강곡선을 보면 블록으로부터의 유입량이 증가하는 전이상태(transition state)가 양수종료까지 계속되고 있음을 알 수 있다.

조병욱 외(1993)에 의해서 수행된 양수시험자료의 분석에 의하면, 3121c공에서 양수에 의한 2434b공, 2433a공, 3122a공, 3121a공의 분할 유동차원은 1.5이며, 2434c공은 1.7로 결정되었다. 또한, 이들은 프락탈 대수층의 특성을 보인다.

북동부지역

북동부지역은 원탕 온천공(4223b공)의 북동쪽에 해당하는 지역으로 임정웅 외(1991), 조병욱 외(1993)에 의해서 양수시험이 수행된 지역이다. 1342b공과 1343b공의 양수시험분석(Fig. 6)에 의하면 분할 유동차원은 2.0이고, 누수성 대수층의 양상을 보인다. 누수성은 1342b공(58.8m)이 1343b공(100.0m)보다 더 크게 나타난다. 그러나, 투수량계수는 1343b공이 1342b공보다 더 크게 나타난다(Table 2).

1343a공의 양수시험 자료(조병욱 외, 1993)를 이용한 양수시험 분석에 의하면, 유동차원은 2.0, 누수계수는 50.0m인 누수성 대수층의 양상을 보인다.

일반화 투수량계수와 산출계수 및 비양수량의 관계

덕산온천 지역의 일반화 투수량계수와 산출계수 및 비양수량의 관련성을 고찰하였다. 비양수량(Specific capacity, SC)은 양수정에서의 지하수(지열수 포함) 토출능력의 효율성을 나타내는 계수로서 $SC=Q/s_w$ (L²T⁻¹)로 표시된다. 여기서, 일정 양수량 Q로 양수할 때의 양수정의 총 수위강하는 s_w 와 같다. 정류상태의 s_w 는 일정수위를 나타내지만, 부정류 상태에서는 지하수위가 계속 하강하므로 어

Table 2. Analysis result for the pumping test

Pumped well	Obs. well	Kb^{3-n} $m^{4-n}s^{-1}$	$S_b b^{3-n}$ m^{2-n}	$K'b^{3-n}$ $m^{4-n}s^{-1}$	$S_b' b^{3-n}$ m^{2-n}	W_s m^2	s_r	B m	n	Model
4234b	4234b	5.12×10^{-5}	1.20×10^{-4}			0.034	0	40	1.9	*LF
4234b	4233a	1.13×10^{-3}	2.65×10^{-3}					76.9	1.9	*LF
4233a	4233a	2.59×10^{-4}	5.10×10^{-4}			0.026	0	100	1.9	*LF
4233a	4234b	9.58×10^{-4}	1.89×10^{-3}					76.9	1.9	*LF
3141a	3141a	1.47×10^{-3}	4.90×10^{-3}			0.01	495	200	1.7	*LF
4232a	4232a	3.83×10^{-3}	2.56×10^{-3}			0	0.7	250	1.9	*LF
4232a	4233c	3.83×10^{-3}	2.56×10^{-3}					250	1.9	*LF
4233c	4233c	5.96×10^{-3}	1.49×10^{-2}			0.05	400	33.3	1.5	*LF
4234a	4234a	1.41×10^{-4}	4.68×10^{-4}			0.06	8.9	76.9	1.9	*LF
3442a	3442a	5.41×10^{-4}	7.95×10^{-5}			0.037	8.75	143	2.0	*LF
3442a	3443a	5.41×10^{-4}	7.95×10^{-5}					143	2.0	*LF
4233b	4233b	6.81×10^{-5}	3.01×10^{-4}			0.09	3.5	1000	1.9	*LF
4233b	4232b	1.07×10^{-3}	3.80×10^{-3}					66.7	1.9	*LF
4223b	4233b	1.43×10^{-3}	9.77×10^{-3}					1000	1.9	*LF
4233d	4233d	2.48×10^{-4}	5.91×10^{-4}			0.035	1.11		1.6	*F
3114a	3114a	2.03×10^{-4}	6.66×10^{-5}			0.023	0	28.6	2.0	*LF
3114b	3114b	1.29×10^{-4}	9.22×10^{-4}	4.39×10^{-1}	2.23×10^{-3}	0.056	5.43		2.0	*SSF
3111a	3111a	3.11×10^{-4}	4.42×10^{-4}			0.035	5.8	47.6	1.9	*LF
3121c	2434b	4.25×10^{-3}	5.81×10^{-3}						1.5	*F
3121c	2434c	1.03×10^{-3}	6.06×10^{-4}						1.7	*F
3121c	3121a	3.30×10^{-3}	3.07×10^{-3}						1.5	*F
3121c	3122a	2.43×10^{-3}	1.69×10^{-2}						1.5	*F
3121c	2433a	8.45×10^{-3}	2.11×10^{-2}						1.5	*F
1343b	1343b	4.73×10^{-4}	2.77×10^{-4}			0.035	2.01	100	2.0	*LF
1343b	1342b	7.47×10^{-4}	2.69×10^{-4}					100	2.0	*LF
1342b	1342b	3.74×10^{-5}	1.40×10^{-3}			0.025	1.92	58.8	2.0	*LF
1342b	1343b	7.54×10^{-4}	4.38×10^{-4}					58.8	2.0	*LF
1343a	1343a	2.13×10^{-4}	3.99×10^{-4}			0.024	3.5	50	2.0	*LF

*LF=leaky fractal model with $S_s'=0$; *SSF=steady-state dual-porosity fractal model; *F=confined fractal model.

덕산온천 지역의 수리적 성질

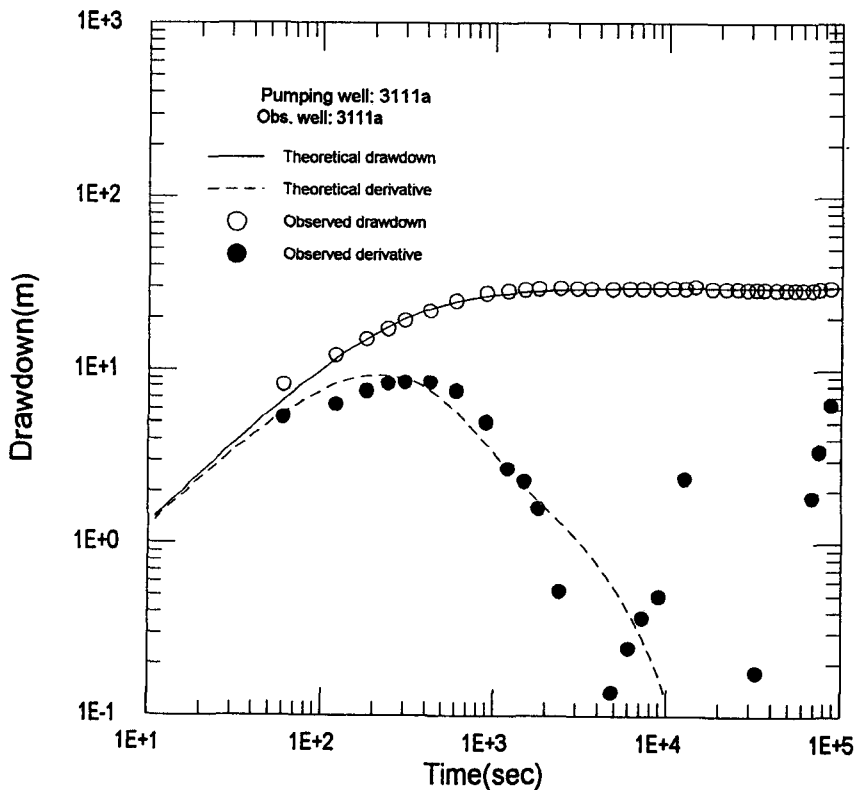
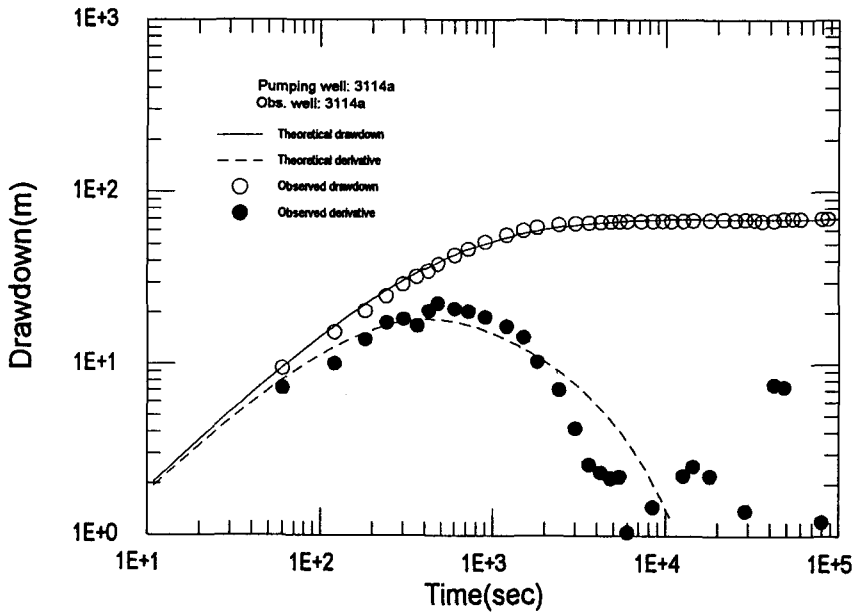


Fig. 5. Analysis of pumping test at holes 3114a, 3111a and 3114b in the northwestern part of Duksan hot-spring area.

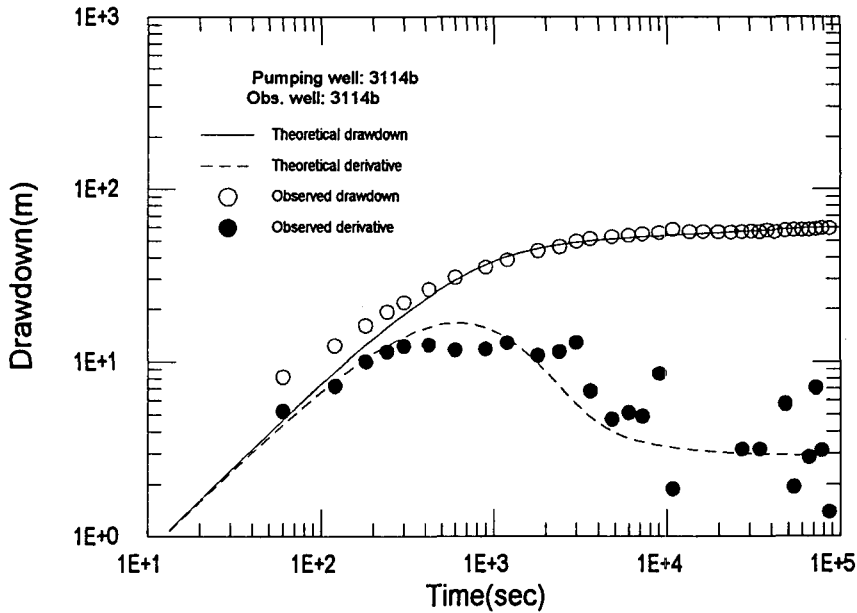


Fig. 5. (Continued)

는 시점의 수위를 기준으로 할 것인가가 어려운 문제이다. 대수층의 규모가 큰 2차원의 방사상 흐름 일 경우에는 양수시간이 어느 정도 경과한 후에 지하수위는 거의 안정되며 이 때의 수위를 s_w 로 보편될 것이다. s_w 에 대한 양수시간은 1일, 1개월 또는 1년이 될 수도 있을 것이다.

양수정의 수위는 우물손실이 없는 경우에는 공벽 바로 바깥의 대수층의 수위(s_q)와 동일할 것이나 우물손실(s_L)이 존재할 경우에는 양수정의 총 수위강하(s_w)는 대수층 손실과 우물손실을 합한 값이 된다. 일반적으로 양수정에서는 점토 또는 가는 모래 또는 화학적 침전에 의해서 공벽이 막히거나, 케이싱, 스트레너 또는 수중펌프로 부터 생기는 난류, 유속의 증가 그리고 응결작용으로 인한 가스체 거 등으로 인하여 우물손실이 일어난다. 또한 양수정의 우물정장효과에 의해서 우물손실효과는 증폭된다. 따라서, 우물설계의 효율성을 평가하기 위해서는 양수정내 총 수위강하를 이용한 비양수량을 알아야 하지만, 대수층의 지하수 산출능력을 보다 정확하게 평가하기 위해서는 우물손실을 제외한 순수한 대수층 손실만을 이용한 산출계수 (productivity index, PI)를 아는 것이 더 중요하다.

덕산은천의 은천공들 중 많은 부분을 차지하고

있는 유동차원 2.0과 1.9에 대한 비양수량과 산출계수를 구하였으며, 이들과 일반화 투수량계수(Kb^{3-n})의 관계를 살펴보았다. 덕산은천은 누수대수층의 특징을 보이므로 은천수위가 쉽게 안정되므로 s_w 는 양수시간 1일을 기준으로 하였다.

유동차원 2.0에 대해서 투수량계수와 비양수량 및 산출계수의 회귀식(Fig. 7)을 보면, 각각

$$SC=0.0021166(Kb)^{0.39167}(\text{상관계수 } R=0.3967) \quad (2)$$

$$PI=1.02929(Kb)^{1.1496}(\text{상관계수 } R=0.8876) \quad (3)$$

따라서, 유동차원 2.0에 대해서는 투수량계수와 산출계수의 상관성이 투수량계수와 비양수량의 상관성보다 훨씬 높게 나타난다.

유동차원 1.9에 대해서 투수량계수와 비양수량 및 산출계수의 회귀식(Fig. 8)을 보면, 각각

$$SC=(Kb^{1.1})^{0.56602}(\text{상관계수 } R=0.9996) \quad (4)$$

$$PI=(Kb^{1.1})^{0.589265}(\text{상관계수 } R=0.9997) \quad (5)$$

이다. 따라서, 유동차원 1.9에 대해서는 일반화 투수량계수와 산출계수의 상관성이 일반화 투수량계수와 비양수량의 상관성과 비슷하게 나타난다. 함세영(1995)에 의하면, 우리 나라의 여러 지역에서 행한 126개 양수시험자료를 이용한 Kb^{3-n} 과 1일, 1개월, 1년 양수시의 PI의 상관계수는 각각 0.75, 0.67, 0.60이며, 1일 양수에 대한 Kb^{3-n} 과 PI의 상관

덕산온천 지역의 수리적 성질

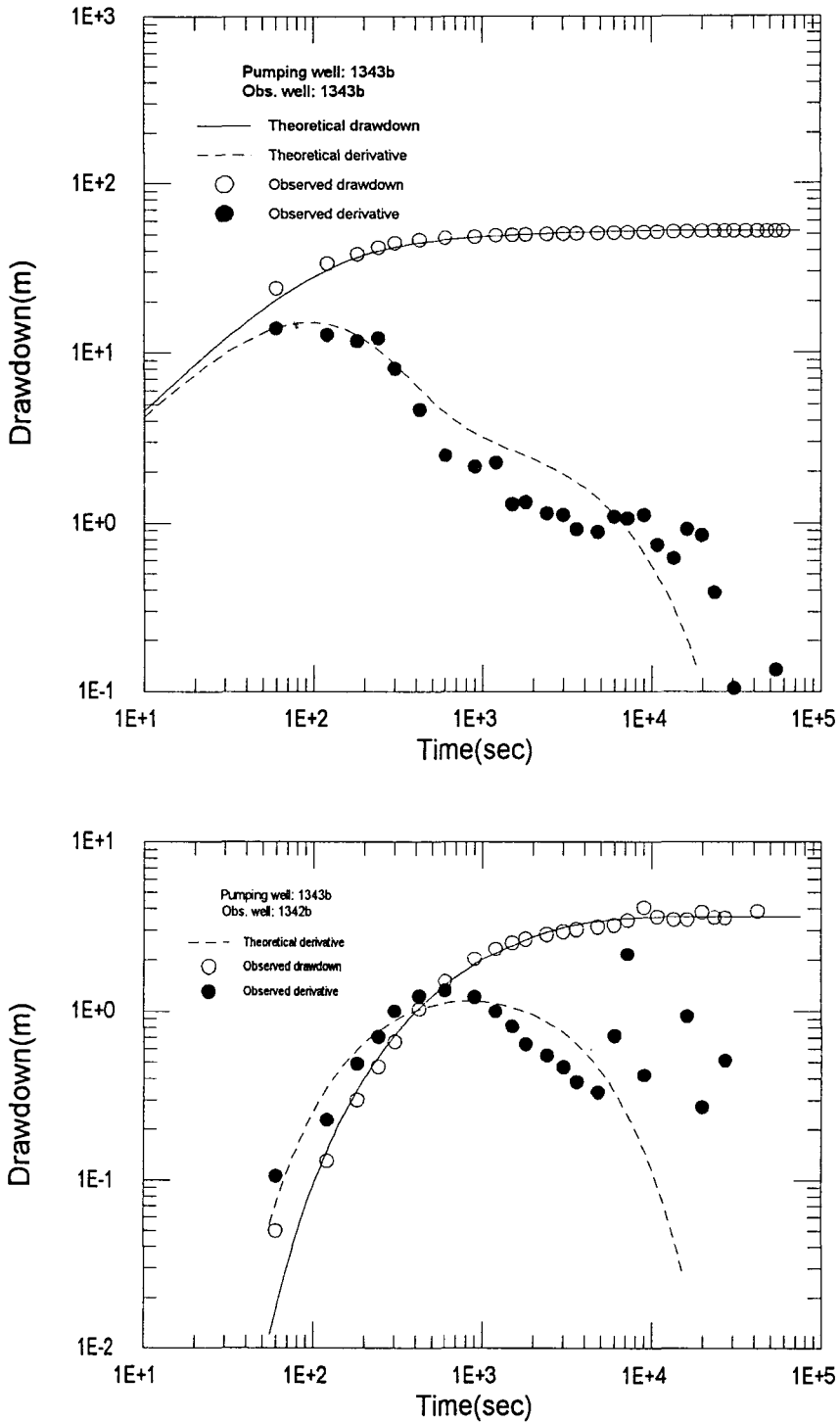


Fig. 6. Analysis of pumping test at holes 1343b and 1342b in the northeastern part of Dusan hot-spring area.

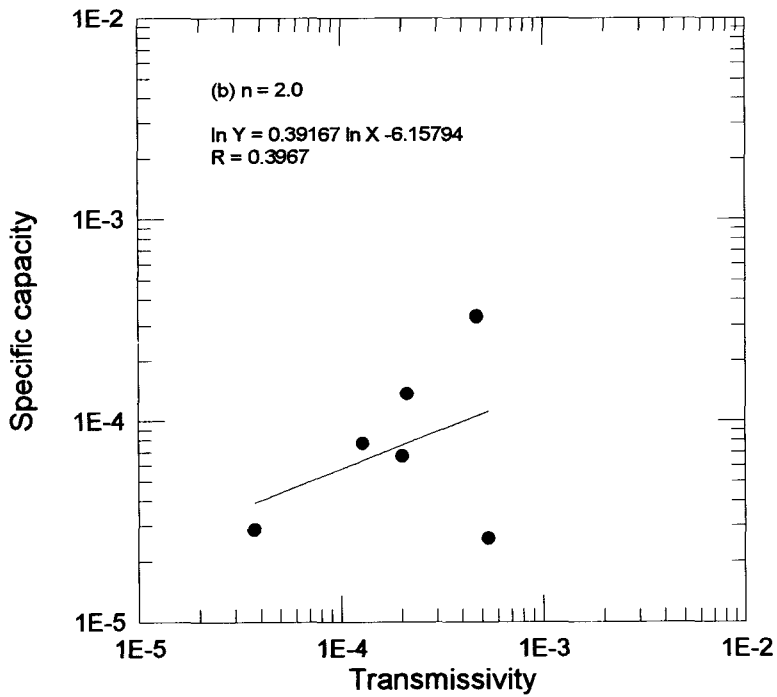
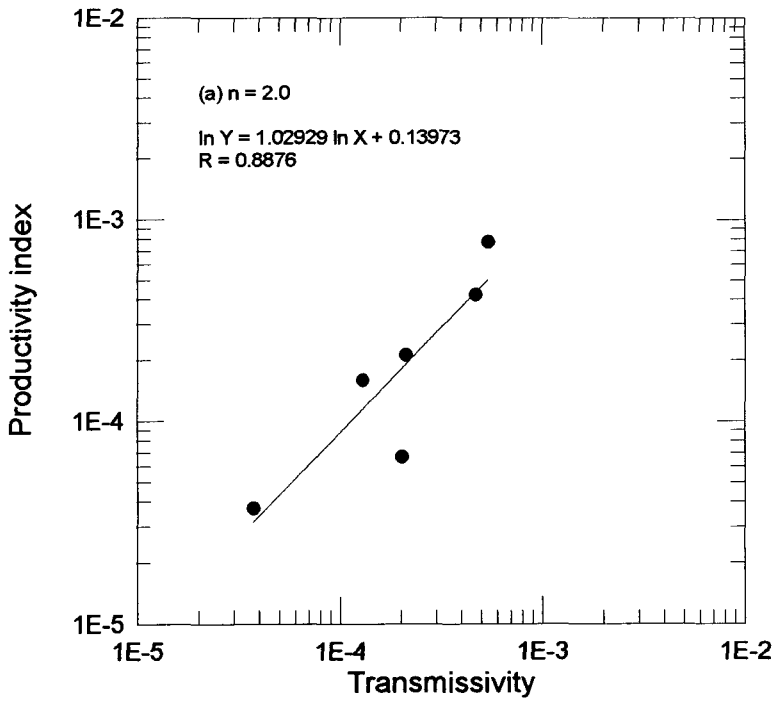


Fig. 7. Relationship between the transmissivity and (a) the productivity index and (b) the specific yield with the fractional flow dimension 2.

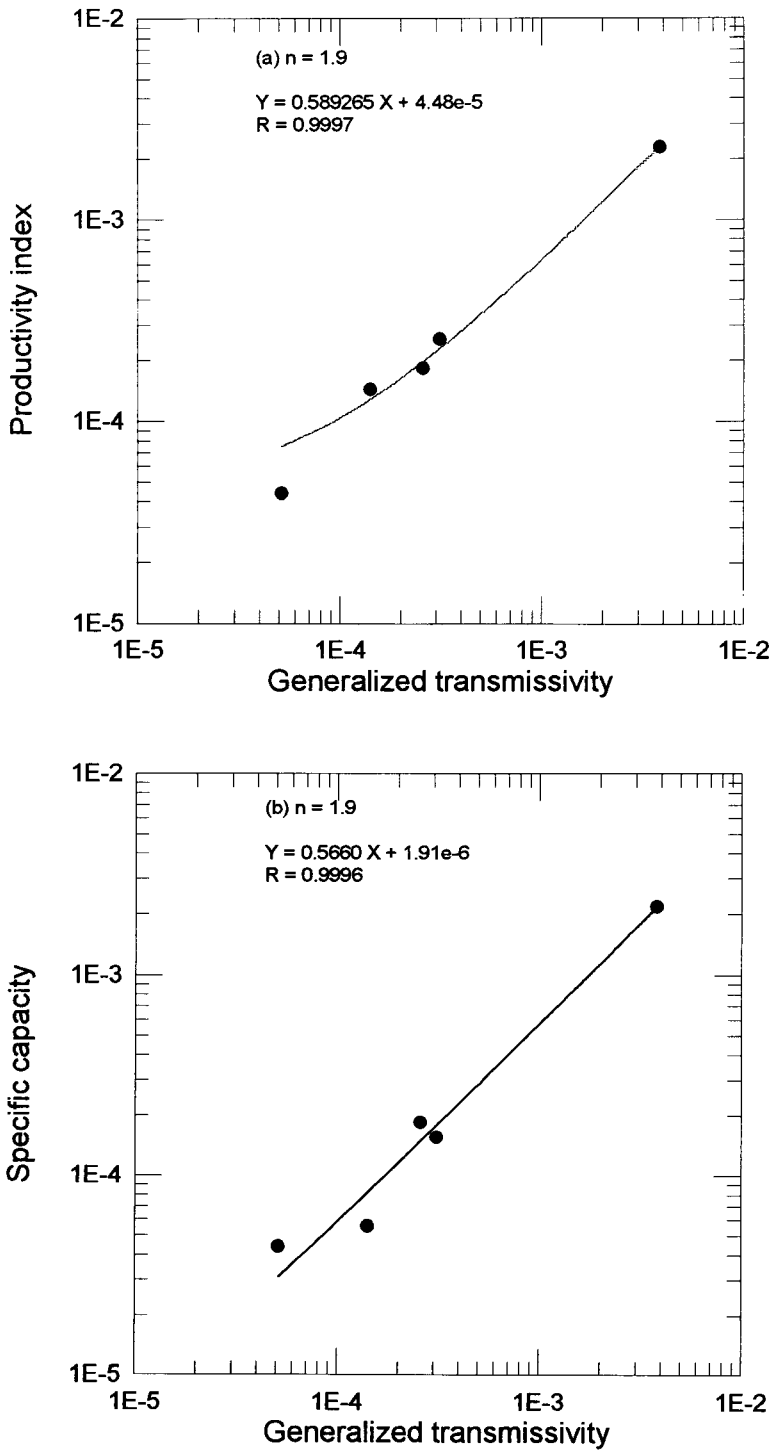


Fig. 8. Relationship between the generalized transmissivity and (a) the productivity index and (b) the specific yield with the fractional flow dimension 1.9.

식은

$$PI = 1.7 \times 10^{-2} (Kb^{3-n})^{0.673} \quad (6)$$

이다. 덕산온천의 1.9 유동차원에 대한 일반화 투수량계수와 PI의 로그-로그 그래프 기울기(0.589)는 전체 유동차원(함세영, 1995)의 기울기(0.673)와 비교적 가깝다.

토의 및 결론

덕산온천지역의 28개 양수시험자료를 덕산원탕 온천공(4223b공)을 중심으로 남부지역과 북부지역으로 나누어 분석하였으며, 분석에 적용된 모델은 프락탈 모델 (Barker, 1988), 누수성 프락탈 모델 (Hamm and Bidaux, 1994a) 및 정상류의 이중공극 프락탈 모델 (Hamm and Bidaux, 1994b)이었다. 양수시험분석에 의한 분할 유동차원은 대체로 온천의 중심부에서는 1.9 또는 2.0의 분할 유동차원을 보이며, 덕산온천의 주변부에서는 1.5~1.7의 범위를 보인다. 덕산온천지역은 충적층으로 덮여 있어서 지표지질조사 및 지구물리탐사에 의해서 밝혀진 지질구조와 수리적 특성과의 관계는 현재로서는 명확하지 않다. 다만 온천의 중심부에서는 균열들의 연결성이 좋으므로 유동차원이 2.0차원에 가깝고, 주변부로 갈수록 수리적 연결성이 점차 낮아지면서 유동차원도 낮아지는 것으로 보인다. 연구지역 중 가장 남쪽에 위치하는 3442a공과 3443a공의 양수시험 분석에서는(3442a공은 양수정, 3443a공은 관측정임) 양수정(3442a공)과 관측정(3443a공)간의 지형상의 거리는 23.8m이지만 수리적인 거리는 89.0m인 것으로 나타났다. 이는 암반대수층내 지하수 유동 통로가 꾸불꾸불하기 때문인 것으로 판단된다. 이때 꾸부러진 정도(tortuosity)(Bear, 1972)는 수리적인 거리를 지형상의 거리로 나눈 값인 3.74이다.

지하수 유동의 프락탈 모델은 분할 유동차원을 도입함으로써 방사상 유동 모델을 이용하는 것보다 대수층의 발달범위와 발달방향에 대한 더 많은 정보를 제공한다. 가끔 균열에 대한 프락탈 차원과 분할 유동차원은 차이가 있을 수 있다. 왜냐하면, 지하수는 주요한 유동 통로(backbone)을 따라서 우선적으로 흐르고 균열 중에서 그 나머지 부분(dead-end clusters)은 지하수 유동에 공헌하지 못하기 때문이다(Sahimi, 1995). 따라서 지하수 유동

의 프락탈 모델과 구조지질 정보를 종합하면 균열 암반내에서 어떤 방향의 어느 균열이 지하수 유동에 더 크게 공헌하는가를 알 수 있을 것이다.

일반화 투수량계수와 산출계수 및 비양수량의 관계에 의하면, 덕산온천 지역에서는 1.9 분할 유동차원의 경우에는 일반화 투수량계수와 대수층 손실만을 이용한 산출계수의 상관성이 총 수위강하에 의한 비양수량의 상관성과 비슷하게 나타나며 상관계수도 높게 나타난다. 그러나, 2.0차원의 경우에는 투수량계수와 대수층 손실에 의한 산출계수의 상관성이 총 수위강하를 이용한 비양수량의 상관성보다 훨씬 높게 나타난다. 따라서, 온천공(또는 지하수공)의 산출능력을 파악하는데 있어서, 분할 유동차원이 중요한 역할을 한다는 것을 알 수 있다.

지하수 유동의 프락탈 모델을 이용하여 온천공(또는 지하수공)의 산출능력을 평가하는 것은 온천수(또는 지하수)를 장기적으로 개발·이용하는데 도움을 줄 것이다. 본 연구결과 및 앞으로의 자료 축적은 덕산온천 지역 온천공의 온천수 산출능력 평가뿐만 아니라 비슷한 조건의 화강암지역의 지하수(또는 지열수)에도 적용될 수 있을 것으로 생각된다.

사 사

이 연구는 한국자원연구소의 지원으로 이루어졌으며, 연구를 지원해주신 관계기관에 감사드립니다. 또한, 이 논문에 대해서 유익한 지적을 해주신 심사위원회에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 내무부, 1983, 온천지, 722p.
- 서만철, 이기화, 1981, 덕산온천일대의 지전기학적 연구, 지질학회지, 17(3), 194-200.
- 신병우, 소철섭, 박봉순, 이상헌, 1989, 한국지질도(1:50000), 해미도폭 설명서, 한국동력자원연구소, 29p.
- 임정웅, 성익환, 조병욱, 김형찬, 1987, 덕산지구 온천공(시량 29-1)조사보고서, 온천조사보고서, 6호, 한국동력자원연구소, 59p.
- 임정웅, 함세영, 조병욱, 김형찬, 1988a, 덕산지구

- 온천공(시량리 27-8)조사보고서, 온천조사 보고서, 14호, 한국동력자원연구소, 57p.
- 임정웅, 조병욱, 김형찬, 염병우, 1988b, 덕산지구 온천공(사동 28-27, 28-36, 28-15, 시량 29-12, 산 48-1)조사보고서, 온천조사보고서, 21호, 한국동력자원연구소, 135p.
- 임정웅, 조병욱, 이봉주, 염병우, 성기성, 1989, 덕산지구 온천공(시량리 27, 27-6, 29-20)조사 보고서, 온천조사보고서 89-18, 39호, 한국동력자원연구소, 73p.
- 임정웅, 조병욱, 이봉주, 김형찬, 김상연, 1990a, 덕산지구 온천공(둔리 산39번지)조사보고서, 온천조사보고서 90-7, 46호, 한국동력자원연구소, 44p.
- 임정웅, 조병욱, 이봉주, 성기성, 김상연, 1990b, 덕산지구 온천공(시량리 29-22)조사보고서, 온천조사보고서 90-14, 53호, 한국동력자원연구소, 46p.
- 임정웅, 조병욱, 이봉주, 송교영, 성기성, 김상연, 1990c, 덕산지구 온천공(시량리 29-16)조사 보고서, 온천조사보고서 90-15, 54호, 한국동력자원연구소, 46p.
- 임정웅, 조병욱, 이봉주, 성기성, 김상연, 1991, 덕산신평지구 온천공(덕산면 신평리 191-7, 191-3) 조사보고서, 온천조사보고서 91-1, 69호, 한국동력자원연구소, 73p.
- 조병욱, 배두중, 1992, 덕산 삼교지구 온천공(예산군 삼교읍 신리 434-2번지)조사보고서, 온천조사보고서 92-2, 84호, 한국자원연구소, 52p.
- 조병욱, 임정웅, 황상기, 김형찬, 이봉주, 1993, 예산 덕산지구 온천자원 평가조사보고서, 온천조사보고서 94-5, 151호, 한국자원연구소, 175p.
- 정봉일, 이기화, 1981, 덕산온천지역의 지열상태에 관한 지질학적 및 지구물리학적 조사연구, 지질학회지, 17, 4, 269-280.
- 함세영, 1995, 프락탈 모델에 의한 한국의 균열 대수층의 수리특성 (I), 지질학회지, 31, 4, 467-482.
- Barker, J. A. 1988, A generalized radial flow model for hydraulic tests in fractured rock, Water Resour. Res., 24, 10, 1796-1804.
- Barenblatt, G. E., Zheltov, I. P. and Kochina, I. N., 1960, Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks, Jour. Appl. Math. Mech. Engl. Transl., 24, 5, 1286-1303.
- Bear, J., 1972, Dynamics of fluids in porous media, American Elsevier Publishing Company, New York, 764p.
- Boulton, N. S., and Streltsova, T. D., 1977, Unsteady flow to a pumped well in a fissured water-bearing formation, Jour. Hydr., 35, 257-269.
- Hamm, S. Y. and Bidaux, P., 1994a, Ecoulements transitoires en géométrie fractale avec drainance : théorie et application. C. R. Acad. Sci. Paris, série II, 318, 2, 227-233.
- Hamm, S. Y. and Bidaux, P., 1994b, Stationary dual-porosity fractal model of groundwater flow in fractured aquifers, Jour. Eng. Geol. 4, 2, 127-138.
- Hantush, M. S., 1956, Analysis of data from pumping tests in leaky aquifers, Transactions, American Geophysical Union, 37, 6, 702-714.
- Hantush, M. S., 1960, Modification of the theory of leaky aquifers, Jour. Geophy. Res., 65, 11, 3713-3725.
- Kazemi, H., 1969, Pressure transient analysis of naturally fractured reservoirs with uniform fracture distributions, Trans. Soc. Pet. Eng., 246, 451-462.
- Moench, A.F., 1984, Double-porosity models for a fissured groundwater reservoir with fracture skin, Water Resour. Res., 20, 7, 831-846.
- Sahimi, 1995, Flow and transport in porous media and fractured rock, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, 482 p.
- Theis, C. V., 1935, The lowering of the piezometer surface and the rate and discharge of a well using ground-water storage, Transactions, American Geophysical Union, 16, 519-524.
- Warren, J.E. and Root, P.J., 1963, The behavior

함세영, 조병욱, 성익환

of naturally fractured reservoirs, Soc. Pet.
Eng. J., 3, 2, 245-255.

함세영(Se-Yeong Hamm)

Division of Earth and Environmental System
Sciences, Pusan National University, Pusan
609-735, Korea

E-mail : hsy@hyowon.pusan.ac.kr

조병욱(Byong Wook Cho)·성익환(Ig Hwan Sung)

Division of Earth Environment Research, Korea
Institute of Geology, Mining and Materials,
P.O. Box 111, Taejon 305-350, Korea

E-mail :

cbw@rock25t.kigam.re.kr (Byong Wook Cho)

sih@rock25t.kigam.re.kr (Ig Hwan Sung)