

양수시험시 방사상흐름을 보이는 균열암반 대수층에서의 우물손실

이철우^{1*} · 이대하¹ · 정지곤² · 김구영¹ · 김용제¹

¹한국지질자원연구원 환경지질연구부

²충남대학교 지질환경과학부

Well Loss in Fractured Rock Formation with Radial Flow during Pumping Test

Cheol-Woo Lee^{1*} · Dae-Ha Lee¹ · Ji-Gon Jeong² · Ku-Young Kim¹ · Yongje Kim¹

¹Environmental Geology Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

²Department of Geology and Earth Environmental Science, Chungnam National University

ABSTRACT

Pumping tests were carried out from seven wells in fractured rocks. The time-drawdown data were obtained from pumping wells and corrected for the elapsed time of step drawdown test using Cooper-Jacob's method. A statistical method, the least square of error, was used to yield the coefficient of aquifer losses, the coefficient of well losses, and the power which indicates the severity of the turbulence. The values of the power range from 1.65 to 6.48. The well losses result mainly from turbulent flow caused by radial flow nearby pumping wells. The turbulent flow depends on Reynolds number. Since the hydraulic characteristics of fractured rocks control the fluid velocity, the value of the power is an important factor to understand the aquifer system of fractured rocks.

Key words : Well loss, Fractured rocks, Step drawdown test, Method of the least square, Radial flow

요 약 문

균열암반내에 시추된 7개의 양수정에서 양수시험을 실시하였다. 여기에서 각 양수율에 따른 수위강하값을 구하였으며, 비평형상태하에서의 단계양수시험은 Cooper-Jacob의 방법에 의해 양수시간을 보정하였다. 양수정에서의 대수층 손실상수, 우물손실상수 및 우물손실지수(n)의 산출은 최소제 곱법(method of the least square)을 이용한 회귀분석 방법을 이용하였으며, n 값의 범위는 1.65~6.48로 산출되었다. 균열암반내에 시추된 양수정의 우물손실은 케이싱이나, 시추시 발생하는 공벽의 공극감소 등의 영향보다는 방사상흐름에 따른 양수정부근에서의 난류에 의한 영향이 대부분일 것으로 해석된다. 또한 이 난류는 레이놀즈의 수(Reynolds number)에 좌우되는데, 여기에서 암반대수층내의 균열 특성이 유체의 속도를 지배하므로 정확한 n 값의 산출은 암반대수층을 이해하는데 중요한 인자가 될 것이다.

주제어 : 우물손실, 균열암반, 단계양수시험, 최소제곱법, 방사상흐름

1. 서 론

대수층의 수리적 특성을 규명하기 위해서는 여러 가지 시험들을 실시한다. 그 중에서 가장 많이 적용되는 방법 중의 하나는 양수시험이다. 양수시험은 대수층을 관통한

양수정에서 지하수를 채수하는 방법으로서 주로 일정율로 지하수를 채수하여 시간에 따른 수위강하로서 대수층의 수리적 특성을 규명한다. 또한 양수시험은 그 목적에 따라 여러 가지의 방법들이 있으며, 이중 단계양수시험은 대수층의 수리적 특성을 규명할 뿐만 아니라, 양수정 자체의 특성도 규명할 수 있다¹⁾.

양수정에서 양수를 실시하면 먼 거리로부터 양수정 부

*Corresponding author : lcw@kigam.re.kr

원고접수일 : 2002. 5. 20 게재승인일 : 2002. 11. 18

근으로 지하수가 유입되는 방사상흐름이 발생되어 양수정 부근에서는 유체가 흐르는 통로가 좁아지고, 따라서 유체의 속도는 급격하게 빨라진다. 여기에서 레이놀즈의 수가 증가하여 난류가 발생하게 된다. 따라서 양수정 부근에서는 이의 저항을 극복하기 위하여 수위강하를 더 크게 발생시키게 되는데 이를 우물손실이라 한다. 다공질 매질의 경우 우물손실이 발생하는 원인은 위의 경우뿐만 아니라 케이싱 스크린의 영향, 시추시 공벽 변형 등의 복합적인 원인에 의해서 우물손실이 발생하게 된다²⁾.

위와 같이 단계양수시험에 따른 대수층손실 및 우물손실에 대한 해석은 주로 다공질 매질에서 이루어 졌으나, 본 논문에서는 균열암반에서 굴착된 양수정의 우물손실 발생 원인 및 시기, 우물손실지수(n)의 산정 방법 등에 대하여 고찰하였다. 또한 단계양수시험 해석에 있어서 기존 방법에서는 단순히 경과시간에 따른 수위강하를 이용하였으나, 여기에서는 Cooper-Jacob방법을 이용하여 단계양수 시험시 발생하는 에러를 최소화하였다.

2. 이론적 배경

2.1. 단계양수시험

양수정 및 대수층에 관한 많은 정보를 제공하는 단계양수시험은 Jacob(1947)에 의해 제안되었으며, 이후 많은 논문들이 발간되어 이 시험에 대한 여러 가지 해석들을 내놓았다. 단계양수시험은 양수율에 대한 수위강하의 관계를 해석할 수 있는 방법중의 하나이며, 이에 대한 식은 다음과 같다.

$$s_w = BQ + CQ^n \quad (1)$$

여기서 s_w 는 양수정에서의 수위강하[L], Q는 양수율[L³T⁻¹], B는 대수층손실상수, C는 우물손실상수 및 n은 우물손실지수이다. Jacob(1947)은 BQ를 대수층의 저항으로 생긴 수위강하라고 하였으며, CQⁿ은 우물 스크린의 근처에서 난류에 의해 생긴 수위강하라고 해석하였다.

Theis(1935)의 수위강하식³⁾에서 간략화된 Jacob(1947)의 식에 의하면 수위강하(s)는

$$s = \frac{2.3Q}{4\pi T} \log \frac{2.25Tt}{r^2 S} \quad (2)$$

와 같은 관계식을 가지며, 여기서 s는 수위강하[L], Q는 양수율[L³T⁻¹], T는 투수량계수[L²T⁻¹], r은 관측점까지의 거리[L] 및 S는 저류계수[dimensionless]이다. 따라서 수위강하(s)는 양수율(Q)과 1차식의 관계를 가지고 있고, 이

는 우물손실이 없는 상태에서의 수위강하이므로 식 (1)의 대수층손실상수(B)는 식 (3)과 같이 표현된다.

$$B = \frac{2.3}{4\pi T} \log \frac{2.25Tt}{r^2 S} \quad (3)$$

식 (2)에서 양수율에 대한 수위강하가 항상 1차식의 관계가 성립되려면 양수시험시 발생하는 수위강하의 영향범위 내에서 Theis(1935)가 가정한 대수층의 조건들을 만족시켜야 하며, 수리적 경계조건이 발생되지 않아야 한다. 이러한 여건 하에서 식 (3)을 보면, 투수량계수(T) 및 저류계수(S)는 일정한 상수로 볼 수 있으나, 거리(r)와 양수시간(t)에 따라 대수층손실상수(B)는 변하게 된다. 즉, 수리상수(T, S)가 같은 대수층에 양수정을 굴착하였다더라도 거리의 제곱에 반비례하여 B는 변하게 되며, 양수시간에 따라서도 B는 변하게 된다.

또한 식 (1)에서 Jacob은 n값에 대하여 2를 제안한 바 있고, Rorabough(1953)는 2.43~2.82라고 언급한 바 있다⁴⁾. 식 (1)의 n값을 풀기 위한 방법으로는 Labadie와 Helweg(1975)가 에러에 대한 최소제곱법(the least square method of the error)을 이용하여 컴퓨터 프로그램을 발표한 바 있고, Müller와 Weber(1983)는 간단한 반복법을 이용하였으며, Kruseman과 de Ridder(1990)는 그래픽을 이용한 접근방법을 시도하였다.

2.2. 암반대수층에서의 우물손실

다공질 매질에 굴착된 양수정에서 양수를 할 경우 지하수는 대수층의 전 두께를 통하여 양수정 내로 유입된다. 이때 양수정에 설치된 케이싱의 스크린, 시추시 발생하는 양수정 벽에서의 공극감소, 양수정 내로 유입시 방사상 흐름으로 인한 유속 증가 등으로 우물손실이 발생하게 된다. 즉, 이러한 요인들은 모두 양수정 부근에서 발생하는 것으로서, 양수정 중심으로부터 거리에 따른 이론적인 대수층손실보다 수위강하를 더 크게 발생시킨다.

Reynolds(1883)는 여러 가지 직경을 갖는 유리관으로 유체의 흐름에 대한 실험을 실시하였다⁵⁾. 이 실험 결과로서 층류에서 난류로 전이되는 임계속도(critical velocity)에 대한 정의를 유도하였으며, 우리에게 잘 알려진 Reynolds number(Re)에 관련된 식을 만들었다. 이 식은 두가지 부분으로 구분될 수 있는데 하나는 viscous forces이고 다른 하나는 inertial forces이며, 이를 식으로 표현하면 아래와 같다.

$$Re = \frac{vd}{\nu} \quad (4)$$

Re : Reynolds number

v : Darcian flux velocity

d : characteristic length (in porous media usually taken as the mean grain diameter)

ν : kinematic viscosity

암반대수층은 주로 암석이 결정화될 때 생기는 1차적인 균열과 지질시대를 통한 각종 지구조 운동으로 생기는 2차적인 균열 등으로 구성되어진다⁶⁾. 이러한 균열암반에 시추된 양수정은 보통 지표로부터 풍화대까지 케이싱을 설치하며, 그 이후 구간은 케이싱을 설치하지 않는 것이 많다. 또한 균열을 관통하는 양수정 내의 공벽에서는 시추시의 충격으로 균열 틈이 크게 벌어지는 경향을 가지고 있다. 따라서 암반대수층에 시추된 양수정에서의 우물손실은 다공질 매질에서와 달리 케이싱이나, 공벽의 공극 감소에 의한 영향은 거의 없는 것으로 추정되며, 주로 방사상흐름에 의한 난류의 영향이 대부분일 것으로 예상된다.

Fig. 1은 암반대수층에 굴착된 양수정의 모식도로서, Fig. 1 a)에서와 같이 한 개의 균열을 관통한 양수정에서 지하수를 채수할 경우, 좁은 균열 틈을 통해 양수정 내로 지하수가 유입하게 된다. 여기에서 $Q_1 < Q_2 < Q_3$ 의 관계를 갖는 각각의 양수율로 지하수를 채수하면, 양수정을 중심으로 일정거리 떨어진 부근에서 각각의 유속은 $v_1 < v_2 < v_3$ 의 관계를 갖는다. 이때에 지하수는 양수정 내로 접근할수록 단면적이 좁아져 점점 속도가 빨라지게 되며, 식 (4)에 의해서 레이놀즈의 수(Reynolds number)가 증가하여 어느 구간부터는 난류가 발생하게 된다. 이 난류는 Fig. 1 b)의 양수정 평면도와 같이 유속의 증가에 따라 난류가 발생하는 구간이 증가하게 된다. 이와 같이 암반대수층에서의 우물손실은 양수정에서 양수시 방사상흐름으로 인한 양수정 부근에서의 난류에 의한 영향이 주원인으로 해석된다.

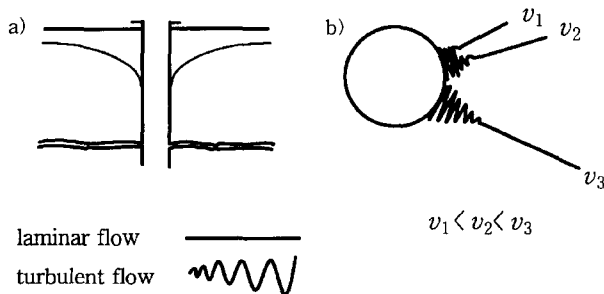


Fig. 1. The turbulent flow ranges nearby pumping well in fractured rocks.

3. 양수시험

암반대수층에 시추된 6개 지역의 7개 양수정에서 양수시험을 실시하였으며, 각 지역별 양수정의 굴착심도, 케이싱 및 수증펌프 설치심도는 Table 1과 같다. 또한 양수시험시에는 각 양수정마다 1회의 장기양수시험과 1회의 단계양수시험을 실시하였다. 장기양수시험은 양수율을 일정하게 진행하였으며, 단계양수시험은 4회에 걸쳐서 양수율을 변화시켰다. 여기에서는 각 양수정에 따라 4개 혹은 5개의 양수율에 따른 수위강하 값을 이용하였다.

전북 완주군에 위치한 양수정에서의 양수시험은 250 m³/day의 양수율로 2880분간 양수하였다. 이후 수위회복을 실시하여 하강하였던 수위를 원상회복 시켰으며, 또다시 200, 300, 350 및 370 m³/day의 양수율로 수위회복 없이 연속하여 단계양수시험을 실시하였다. 단계양수시험시간은 각 양수율별 600, 300, 300 및 300분씩 실시하였다.

양수시험의 결과는 Fig. 2에서와 같으며, 시간별 수위강하를 편대수 방안지에 도시하였다. 여기에서 보면 일정시간 경과 후 수위가 더 이상 하강하지 않는 평형상태(steady state)를 보이고 있으며, 각 양수율별 수위강하는 Table 2에서 보는 바와 같다.

충북 음성군에 위치한 양수정에서의 양수시험은 200 m³/day의 양수율로 2880분간 양수하였다. 이후 수위회복을 실시하여 하강하였던 수위를 원상회복 시켰으며, 전북 완주군에서의 단계양수시험과 같은 방법으로 250, 300, 350 및 440 m³/day의 양수율로 단계양수시험을 실시하였다. 단계양수시험시간은 각 양수율별 730, 300, 300 및 300분씩 실시하였다.

양수시험의 결과는 Fig. 3에서와 같으며, 시간별 수위강하를 편대수 방안지에 도시하였다. 여기에서 보면 양수시간 경과에 따라 수위가 계속 하강하는 비평형상태(unsteady state)를 보이고 있으며, 2단계부터의 양수시험은 이전 단계의 수위강하 영향을 받으므로 이를 아래와 같은 Cooper-Jacob의 식⁷⁾에 의하여 양수시간을 보정하였다.

$$\log t_c = \frac{\sum \{ \Delta Q_i \times \log(t_n - t_i) \}}{\sum \Delta Q_i} \quad (5)$$

여기에서 t_c 는 보정시간, ΔQ_i 는 단계별 양수율 증가분, t_n 은 n 단계까지의 총경과시간 및 t_i 는 단계별 양수 시작 시간이다. 각 양수율별 수위강하는 시간경과에 따라 계속 커지므로 1000분을 기준으로 하였으며, 이는 Table 2에서 보는 바와 같다.

이외의 지역에서는 단계양수시험 자료만을 이용하였으

Table 1. Physical Parameters of Pumping Wells in Fractured Rocks

Location	Well Depth	Casing (No screen)	Pump Depth
Jeollabuk-do Wanju-gun Unju-myeon Godang-ri	702m	Diameter 8" 300m	40HP 30dan 582m
Chungcheongbuk-do Eumseong-gun Daeso-myeon Sutae-ri	764m	Diameter 8" 170m	40HP 30dan 600m
Gyeongsangnam-do Geoje-si Sinhyeone-up Yangjeong-ri	802m	Diameter 8" 62m	40HP 30dan 650m
Gyeongsangbuk-do Yeongju-si Dansan-myeon Dongwon-ri(A)	996m	Diameter 8" 349m	40HP 30dan 780m
Gyeongsangbuk-do Yeongju-si Dansan-myeon Dongwon-ri(B)	900m	Diameter 8" 332m	40HP 30dan 780m
Gyeonggi-do Pocheon-gun Ildong-myeon Whadae-ri	800m	Diameter 8" 280m	40HP 20dan 548m
Daegu-si Dong-gu Jungdae-dong	700m	Diameter 8" 208m	40HP 22dan 560m

Table 2. Discharge Rate-Drawdown Data obtained from Pumping Test

Location	Q (m ³ /day)	time (min.)	s _w (m)	Q/s _w	s _w /Q
Jeollabuk-do Wanju-gun	200	600	17.06	11.7233	0.0853
	250	2880	33.70	7.4184	0.1348
	300	300	58.57	5.1221	0.1952
	350	300	136.51	2.5639	0.3900
	370	300	180.34	2.0517	0.4874
Chungcheongbuk-do Eumseong-gun	200	2880	24.34	8.2169	0.1217
	250	730	33.29	7.5098	0.1332
	300	300	43.62	6.8776	0.1454
	350	300	55.51	6.3052	0.1586
	440	300	81.79	5.3796	0.1859
Gyeongsangnam-do Gyeje-si	300	1200	36.76	8.1610	0.1225
	340	180	49.86	6.8191	0.1466
	380	180	61.85	6.1439	0.1628
	420	180	78.67	5.3388	0.1873
Gyeongsangbuk-do Yeongju-si(A)	200	1260	41.25	4.8485	0.2063
	280	210	67.77	4.1316	0.2420
	360	240	114.53	3.1433	0.3181
	440	210	166.77	2.6384	0.3790
Gyeongsangbuk-do Yeongju-si(B)	150	1200	75.25	1.9934	0.5017
	180	180	99.48	1.8094	0.5527
	210	180	120.18	1.7474	0.5723
	240	180	147.76	1.6243	0.6157
Gyeonggi-do Pocheon-gun	250	1080	49.07	5.0948	0.1963
	300	300	60.32	4.9735	0.2011
	350	300	72.54	4.8249	0.2073
	400	300	85.19	4.6954	0.2130
Daegu-si Jungdae-dong	380	600	48.36	7.8577	0.1273
	450	300	63.08	7.1338	0.1402
	520	300	80.01	6.4992	0.1539
	600	300	101.12	5.9335	0.1685

며 수위강하가 비평형상태를 유지하므로 식 (5)에 의하여 양수시간을 보정하였다. 또한 양수시간 역시 1000분을 기준으로 하여 이때의 수위강하를 Table 2에 기재하였다.

4. 대수층손실과 우물손실 산출

양수정에서 양수시 수위강하는 식 (1)에서와 같이 대수

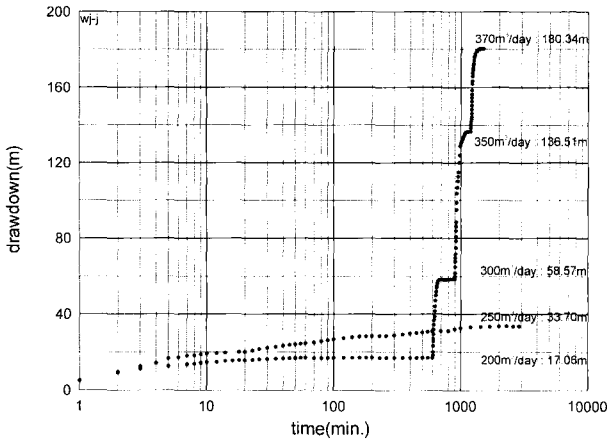


Fig. 2. Time-drawdown data from pumping tests at Wanju-gun, Jeollabuk-do.

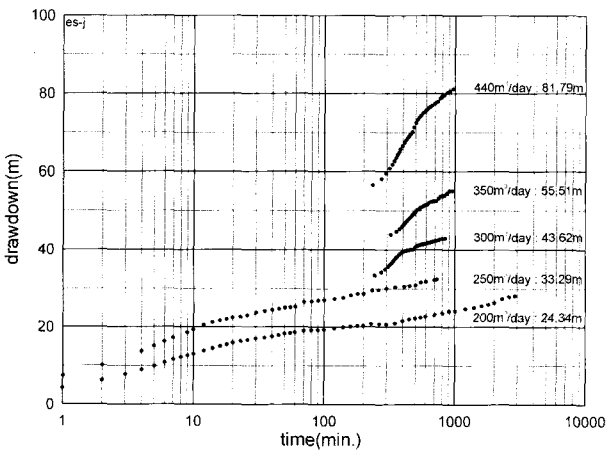


Fig. 3. Time-drawdown data from pumping tests at eumseong-, Chungcheongbuk-do.

층손실과 우물손실로 구분되어 진다. 이 식에서의 B, C 및 n을 구하기 위한 여러 가지 방법들이 있으나, 여기에서는 최소제곱법(method of the least square)을 이용한 회귀분석 방법을 이용하였다. 이 방법은 Labadie와 Helweg (1975)⁸⁾가 이용했던 것과 비슷한 방법으로서, 아래와 같은 식에 의해서 회귀분석이 실시되었다.

$$D = \sum_{i=1}^N (BQ_i + CQ_i^n - s_{wi})^2 \quad (6)$$

여기에서 D가 최소가 되는 B, C 및 n값을 구하게 되는데, n값이 식 (6)의 지수에 해당하므로 직접 풀기에는 다소 복잡하게 된다. 따라서 이 논문에서는 n값을 임의로 바꾸어 가면서 회귀분석을 실시하였으며, 여기에서 n값이 정해질 경우 B, C를 구하는 문제는 다음의 식에 의하여 쉽게 해결될 수 있다.

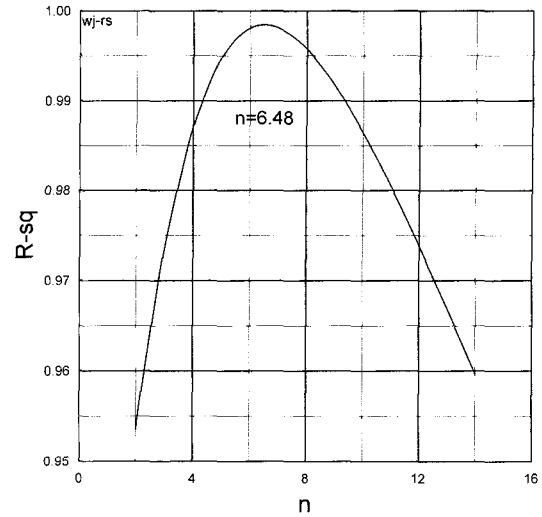


Fig. 4. Relationships of n-R² in pumping well at Wanju-gun, Jeollabuk-do.

$$\frac{\partial D(n)}{\partial B} = \sum_{i=1}^N (BQ_i + CQ_i^n - s_{wi})Q_i = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial D(n)}{\partial B} = \sum_{i=1}^N (BQ_i + CQ_i^n - s_{wi})nCQ_i^{n-1} = 0 \quad (8)$$

위 식은 각각 B 및 C에 대하여 편미분을 하고 이를 영으로 놓아 최소제곱값을 구하는 방법으로서, 이를 연립방정식으로 정리하면 B, C를 쉽게 구할 수 있다. 또한 이 방법으로 구한 값들은 Labadie와 Helweg(1975)의 FASTEP 프로그램으로 구한 값들과 일치하고 있다.

전북 완주군에서의 각 양수유에 따른 수위강하 값을 이용하여 임의의 n에 대한 회귀분석을 실시하였다. 이때 각 n값에 따른 R-square(R²)의 값을 비교하여 보았으며, Fig. 4에서와 같이 n이 6.48일 때 R²가 최고값(0.99844)을 보였다. 이때 회귀분석된 식은

$$s_w = 7.52 \times 10^{-2} Q + 3.51 \times 10^{-15} Q^{6.48} \quad (9)$$

와 같으며, 여기에서 대수층층손실상수는 7.52×10⁻², 우물손실상수는 3.51×10⁻¹⁵ 및 n은 6.48로 계산되었다. Fig. 5는 각 양수유에 대한 수위강하 자료와 회귀분석된 식 (9)를 도시하여 본 것이며, 양수유 증가에 따라 우물효율(E_w)이 급격하게 감소되는 것을 알 수 있다.

충북 음성군에 있는 양수정의 양수자료(Table 2)역시 같은 방법으로 분석되었으며, Fig. 6에서 보논바와 같이 n이 2.55일 때 R²가 최고값(0.999995)을 보였으며, 이때 회귀분석된 식은

$$s_w = 9.52 \times 10^{-2} Q + 7.24 \times 10^{-6} Q^{2.55} \quad (10)$$

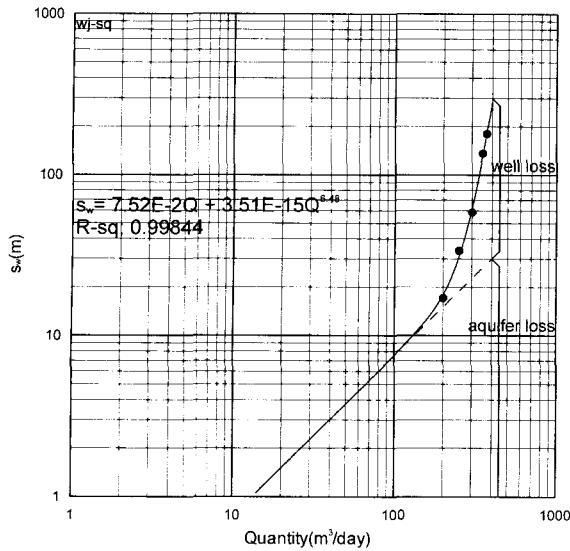


Fig. 5. Analysis of data from pumping tests at Wanju-gun, Jeollabuk-do.

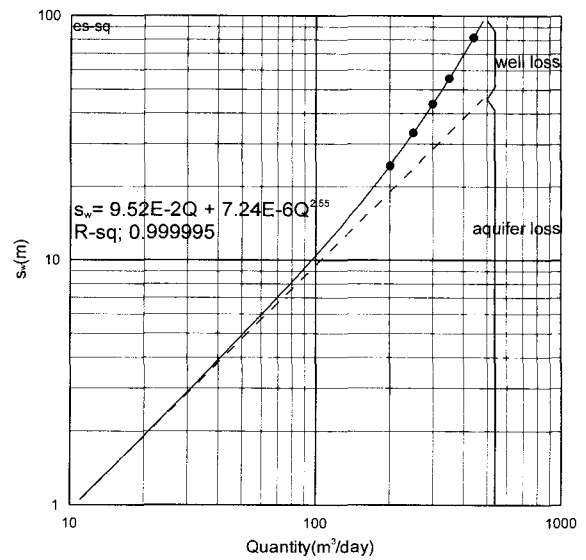


Fig. 7. Analysis of data from pumping tests at Eumseong-gun, Chungcheongbuk-do.

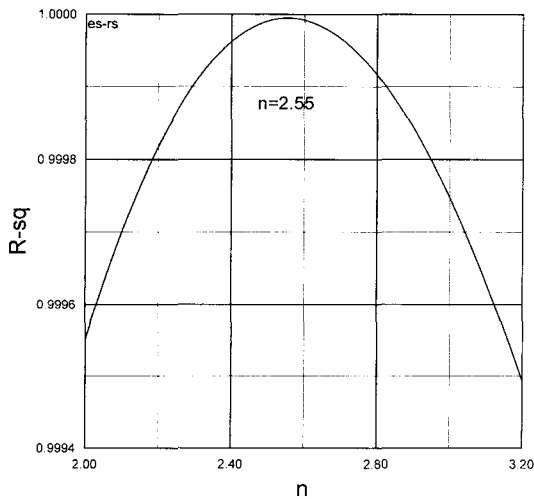


Fig. 6. Relationships of $n-R^2$ in pumping well at Eumseong-gun, Chungcheongbuk-do.

와 같다. 여기에서 대수층손실상수는 9.52×10^{-2} , 우물손실상수는 7.24×10^{-6} 및 n 은 2.55로 계산되었다. Fig. 7은

양수자료와 식 (10)을 도시한 것이며, R^2 가 1에 가까우므로 실제 양수자료와 회귀식에 의한 선이 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 또한 우물효율(E_w)을 계산하여 보면 양수율의 범위내에서 약 51~78%로 계산되었다.

이외의 자료 역시 R^2 가 최고값을 보이는 n 에서의 B, C값을 구하였으며, 각 양수정에서의 이들 값들을 정리하여 보면 Table 3과 같다.

5. 결과 및 토의

양수정에서 각 양수율에 따른 수위강하 자료를 이용하여 대수층손실상수(B), 우물손실상수(C) 및 n 값을 산출하여 보았다. Table 3에서 보는바와 같이 n 값은 1.65~6.48의 범위를 보였으며, 이는 균열암반의 수리적 특성이 매우 다양할 가능성을 내포하고 있다. 따라서 균열암반에 굴착된 양수정에서는 Jacob(1947)이나 Rorabough(1953)가 제안한 한정된 n 값을 보이지 않기 때문에 양수시험을 통

Table 3. Values of B, C, n and R^2

Location	B	C	n	R^2
Jeollabuk-do Wanju-gun	7.52E-2	3.51E-15	6.48	0.99844
Chungcheongbuk-do Eumseong-gun	9.52E-2	7.24E-6	2.55	0.999995
Gyeosangnam-do Geoje	1.10E-2	6.06E-5	2.32	0.99818
Gyeosangbuk-do Yeongju(A)	1.22E-1	2.33E-5	2.53	0.99848
Gyeosangbuk-do Yeongju(B)	2.03E-1	1.16E-2	1.65	0.99806
Gyeonggi-do Pocheon-gun	1.79E-1	6.16E-6	2.44	0.99998
Daegu-si Jungdae-dong	4.88E-2	3.12E-4	1.93	0.99998

하여 실제로 n 값을 구하여야 할 것으로 생각된다.

또한 n 값은 우물손실에 대한 지수에 해당하므로 그 값에 따라 우물손실이 크게 좌우된다. 따라서 균열암반에서 우물손실을 좌우하는 주 요인이 양수정 부근에서의 난류라 할 경우, n 값이 크면 양수율 증가에 따라 난류구간이 상대적으로 크게 확장되고, n 값이 작으면 양수율 증가에 따라 난류구간이 상대적으로 작게 확장되는 균열모델을 생각해 볼 수 있다.

균열암반에 굴착된 양수정에서 양수가 진행될 시 우물손실이 발생하는 시기는 그림 2 및 그림 3에서와 같이 양수율이 변화될 때 수위강하가 급격히 일어나는 초기이며, 그 이후 계속되는 수위강하는 대수층 수리특성에 따른 저항(대수층손실)에 의한 것으로 해석된다. 즉 양수율 증가에 따른 난류구간은 식 (4)에 의해 좌우되는데, 여기에서 단계양수시험시 유속을 지배하는 양수율 증가 이외에 어떤 변수도 변하지 않기 때문에 양수율이 변하는 초기에 우물손실이 발생할 것으로 해석된다.

6. 결 론

암반대수층에 굴착된 7개의 양수정에서 양수시험을 실시하여 각 양수율에 따른 수위강하를 구하였다. 이들 자료를 가지고 최소제곱법(method of the least square)에 의한 회귀분석을 실시하여 각 양수정에서의 대수층손실상수, 우물손실상수 및 n 값을 산출하였으며, 이 방법은 Labadie와 Helweg(1975)의 FASTEP 프로그램으로 구한 값들과 일치한다.

(1) n 값의 분포는 1.65~6.48로 다소 폭넓은 값들을 보여주고 있으며, 따라서 암반대수층에서의 n 값은 각 양수정에서의 자료로 직접 산출하여야 할 것으로 사료된다.

(2) 암반대수층에서의 우물손실은 다공질매질에서의 것과 달리 주로 양수정 부근에서의 난류에 의한 영향으로 해석하였으며, 이 난류는 레이놀즈의 수(Reynolds number)에 의해 좌우된다. 따라서 양수율의 증가는 양수정 부근에서 난류를 발생시키는 구간을 확장시켜 우물손실을 크게 하며, 암반대수층을 구성하는 균열의 특성 또한 유체의 속도와 관계되므로 우물손실에 영향을 미칠 것으로 사

료된다.

(3) n 값은 우물손실의 지수로서 이 값이 크고 작음에 따라 양수정 내의 우물손실이 차지하는 비율을 크게 좌우한다. 또한 유체의 속도를 지배하는 암반대수층 내의 균열의 특성과 n 값이 서로 상관관계를 가진다고 볼 때, 정확한 n 값의 산출은 암반대수층을 해석하는데 유용할 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(3-2-1)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. Kawecki, M. W., "Meaningful Interpretation of Step-Drawdown Tests", *Ground Water*, **33**(1), pp. 23-32(1995).
2. Jacob, C. E., "Drawdown Test to Determine Effective Radius of Artesian Well", *Transactions, ASCE*, **112**, pp. 1047-1070 (1947).
3. Theis, C. V., "The Relation Between The Lowering of The Piezometric Surface and The Rate and Duration of Discharge of A Well using Groundwater Storage", *Transactions, American Geophysical Union*, **16**, pp. 519-524 (1935).
4. Rorabough, M. I., "Graphical and Theoretical Analysis of Step-drawdown Test of Artesian well", *Proceedings Separate No. 362, ASCE*, **79**, pp. 1-23 (1953).
5. Reynolds, O., "An Experimental Investigation of the Circumstances Which Determine Whether the Motion of Water Shall Be Direct or Sinuous and the Law of Resistance in Parallel Channels." *Roy. Soc., London Trans.* A174 (1883).
6. Van Golf-Racht, T. D., *Fundamentals of Fractured Reservoir Engineering*, New York, Elsevier (1982).
7. Cooper, H. H. and Jacob, C. E., "A Generalized Graphical Method for Evaluating Formation Constants and Summarizing Well Field History", *American Geophysical Union*, **27**, pp. 526-534 (1946).
8. Labadie, J. W. and Helweg, O. J., "Step-Drawdown Test Analysis by Computer", *Ground Water*, **13**(5), pp. 438-444 (1975).