

인공수압파쇄기법에 의한 지하수 양수량 증대

한정상¹ · 안종성² · 윤윤영³ · 김형수⁴ · 백건하²

¹연세대학교 객원교수, ³(주)한서엔지니어링, ⁴한국수자원공사 수자원연구소

²연세대학교 지구시스템과학과 · 한서엔지니어링

Improving Groundwater Recovery by Hydrofracturing

J. S. Hahn¹ · J. S. AHN² · Y. Y. YUN³ · H. S. KIM⁴ · G. H. BAEK²

¹Yonsei University

²Korea Atomic Energy Research Institute

³HANS Engineering Co., Ltd.

⁴Korea Water Institute

ABSTRACT

There are two case history. One is the case of 3 wells-group well system-drilled and artificially hydrofractured for dewatering to help to excavate and treat deep building foundation. The recoveries of groundwater of 3 wells are increased 29%, 42% and 110% respectively through hydrofracturing. Simultaneous pumping test reveals that 3 wells are geohydrologically interconnected considering lowered specific capacity comprising influence of additional drawdown effect by other 2 wells compared to single well test. Response time effect during single well test shows that dominant lineaments are more expandable to other geological structures. The other one is the case of 28% increasing of groundwater productivity for domestic use by hydrofracturing.

Key Words : Hydrofracturing, Increasing of groundwater productivity

* Corresponding author : geohans@chollian.net

원고접수일 : 2002. 3.21 게재승인일 : 2002. 5.24

요약문

건물기초굴착을 위한 암반층의 지하수위를 효과적으로 낮추기 위하여 3개의 군정을 설치하고 인공수압파쇄를 실시한 결과 각 우물의 산출량은 29%, 42% 및 110% 증가하였으나, 동시험시 양수시 비양수량이 단정 양수시와 비교하여 추가 수위강하 효과에도 불구하고 모두 소폭으로 감소하여 3개 우물의 파쇄대가 수리적으로 서로 연결되었음을 확인하였다. 가장 먼 거리에 있는 기존의 지질구조(단열계) 방향으로 인공파쇄대가 가장 크게 확장되어 성공적으로 지하굴착을 수행할 수 있었다. 다른 사례로는 생활용수 양수량 증대를 목적으로 시행한 사례로 산출성이 약 28% 증대되었다.

주제어 : 인공수압파쇄공법, 산출성 증대

1. 서 론

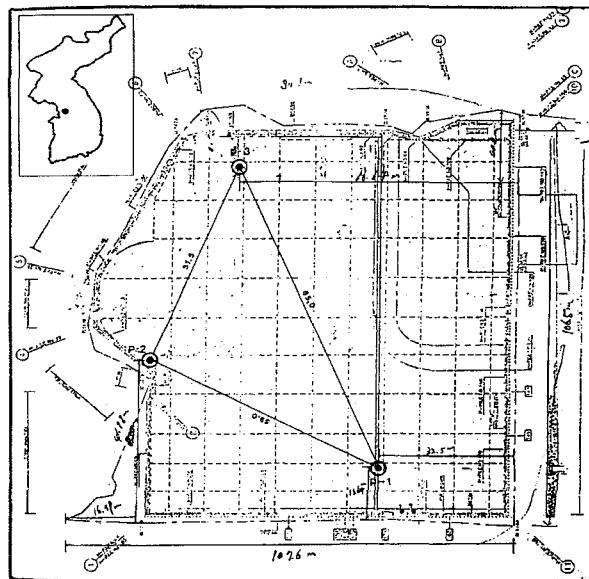
지하수조사연보에 의하면 45,983공의 방치폐공의 29.5%인 13,567공이 수량부족으로 방치되어 폐공처리되고 있다. 지하수 개발은 상당한 경비와 시간의 소모를 초래할 뿐만 아니라 방치시 지하수환경에 미치는 악영향이 지대하므로 개발시 세심한 배려가 요구된다. 또한 일단 개발된 우물은 철저한 관리로 수명을 연장시켜야 하며, 부득이 우물이 개발 당시의 능력을 상당 부분 손실한 경우라도 곧바로 폐공처리하는 것보다는 최신 기술을 이용하여 재생시키려는 노력이 필요하다. 본 연구는 석유 생산정의 개발시 생산성을 증대시키기 위하여 보편적으로 사용되는 인공수압파쇄기법을 지하수의 양수량 증대에 이용하기 위한 기초적인 기술을 확립하여 수량부족으로 방치·폐기되는 지하수 우물의 수를 경감시키며, 나아가 지열이용 및 오염 우물의 정화에 적용될 수 있는 응용기술을 개발하는 것이다.

이 논문은 기초굴착을 위한 수위저하를 목적으로 수압파쇄기법을 적용한 사례와 생활용수로 개발된 우물의 양수량 증대에 적용한 사례로서 일련의 시험계획 중의 일부이다. 향후 연구가 진행됨에 따라 수문지질 단위 및 단열구조별로 수압파쇄기법의 효과를 분석하기 위한 사례가 계속하여 발표될 것이다.

2. 사례 2편

사례 1. Dewatering 공사를 위해 실시한 인공수압파쇄작업

1993년 2개월간 (주)한서엔지니어링은 경기도 과천시에 있는 우정병원의 기초 공사시 기반암에서 용출되는 암반지하수를 강제 배수시켜 지하수위를 굴착저면 하부까지 장기적으로 하강시키고, 이를 공사용수로 활용하기 위하여 기초굴토 저면 하부에 심도 88m~111m에 이르는 3개공의 심정을 설치하였다.



<경기도 과천시 갈현3동 641번지>

Fig. 1. Location Map and Wells tested.

Table 1. Groundwater Recovery before Hydrofracturing by Depth

Hole Number	Drilling Depth(m)	Groundwater Recovery during Drilling($m^3 d^{-1}$)	Percentile(%)
P-1	15	40	15
	47	160	62
	68	60	23
	계	260	100
P-2	30	20	12.5
	100	140	87.5
	계	160	100
P-3	10	15	15
	50	35	35
	83	50	50
	계	100	100

이들 3개공은 수두가 모두 다르고 수리적으로 서로 연결되어 있지 않았다. 격리된 파쇄단열을 수리적으로 연결시키기 위하여 인공수압파쇄 작업과 공내검출, 수질분석, 대수성시험을 실시하였으며 본문에서는 사전 사후 대수성시험 결과를 중심으로 기술하였다.

본 공은 Dewatering과 이수목적으로 굴착한 심정이므로 각 심정간에 발달된 2차 유효공극의 연결성을 극대화 시키기 위하여 고압펌프장비를 이용하여 각 공별로 인공수압파쇄 공법을 실시하였다.

Table 2. Summary of Hydrofracturing

(일시 1993년 3월 30일~31일)

Hole Number	Test sequence	Depth (m)	Time (hr:min)	Injected water (m^3)	Test Pressure (bar)	Pressure Drop (bar)	Color of Overflow after Test	Remarks
P-1	1	12	4:10	-	150	0→0	흙탕물	총심도 : 86m 자연수위 : 지표면하 0m casing 설치심도 : 4.5m 초기 산출량 : $260 m^3 d^{-1}$ 파쇄후 산출량 : $336 m^3 d^{-1}$
	2	36	4:50	-	150	5→0		
	3	63	9:20	3.53	150	70→60		
P-2	1	24	6:55	4.15	150	0→0	흙탕물 회색 스라임	총심도 : 112m 자연수위 : 지표면하 6.9m casing 설치심도 : 15.4m 초기 산출량 : $140 m^3 d^{-1}$ 파쇄후 산출량 : $240 m^3 d^{-1}$
	2	60	12:30	3.75	150	200→100→0		
	3	96	14:20	3.44	150	120→100		
P-3	1	12	6:50	4.10	150	55→25	진실색	총심도 : 111m 자연수위 : 지표면하 2.35m casing 설치심도 : 3m 초기 산출량 : $100 m^3 d^{-1}$ 파쇄후 산출량 : $210 m^3 d^{-1}$
	2	42	9:30	3.53	150-100	70→60→55		
	3	78	8:00	3.50	150	100→60		

(가) P-1공

(1) 지하지질과 초기산출량

본 공은 안양-과천간 국도변에 인접한 부지내에 설치하였다. 굴착저면에서 표면하 4.5m 구간까지는 $\Phi 14''$ 로 굴착한 후, $\Phi 8''$ hammer bit로 굴착하여 나공 상태로 심정을 설치하였다.

0~4.5m 구간은 비교적 풍화를 많이 받은 호상편마암의 연암대이고 그 하부는 신선견고한 편마암으로 구성되어 있다. 수압파쇄공법 실시 이전에 본공의 공내 파쇄대 발달구간을 확인하기 위하여 실시한 착정주상도와 우물검증결과에 의거 착정시 확인한 바, 공내 10~15m 구간, 35~47m 구간 및 60~68m 구간에는 심한 파쇄대가 발달되어 있다. 본 공 굴착 완료 후 각 파쇄대 구간에서 산출된 초기채수량은 $260\text{m}^3/\text{일}$ 규모였다. 굴착당시 각 심도별 산출량은 Table 1과 같다.

(2) 수압파쇄 후 산출량

수압파쇄공법은 Single packer법을 적용하였으며, 본 공은 공내 12m, 36m 및 63m 지점에 8" 인장패커를 설치하여 150 bar의 초기압력을 가하면서 각 심도 별로 약 3.5m^3 의 물을 4분 10초에서 9분 20초 동안 주입시켰다. 인공수압파쇄결과는 Table 2와 같다.

12m와 36m 구간은 평균 주입율을 14l/s ($1,209.6\text{m}^3\text{d}^{-1}$) 및 12l/s ($1,036.8\text{m}^3\text{d}^{-1}$)로 청수를 주입시 주입 압 150 bar에서 암석이 파쇄되기 시작하여 파쇄압이

0 bar로 하강하였으며, 이때 흑갈색의 지하수가 공외로 용출되었다. 63m 구간에서는 평균주입율 6.3l/s ($544.3\text{m}^3\text{d}^{-1}$)로 청수를 150 bar의 압력으로 주입하였는데 주입개시 9분 20초 후 주입압은 60 bar로 감소하였다. 본 공의 자연수위는 굴착된 지표하 0m였으며, 인공수압파쇄를 시킨 후 대수성시험시 측정된 본 공의 최종 산출량은 $336\text{m}^3\text{d}^{-1}$ 였다. 따라서 수압파쇄 효율은 약 29% 정도이다. $336\text{m}^3\text{d}^{-1}$ 의 율로 8시간 동안 대수성시험을 실시한 결과 안정수위는 지표하 48.65m 였다. 따라서 본 공의 비양수량은 $6.9\text{m}^3\text{d}^{-1}$ 이며, 본공의 평균 투수량계수는 $3.57\text{m}^2\text{d}^{-1}$ 이고, 평균수리전도도는 0.041md^{-1} 이며, 평균저류계수는 5.87×10^{-4} 이었다(Table 3 및 Fig. 2 참조).

(나) P-2공

(1) 지하지질과 초기산출량

본 공은 현 기초굴착저면보다 약 11m 높은 지점에서 총 심도 112m 를 굴착한 심정으로 지표면하 15.4m 까지는 $\Phi 14''$ 로 굴착하여 $\Phi 8''$ SS 우물자재를 설치하였고, 그 하부 15.4m 에서 공저인 112m 는 $8''$ 로 굴착하였다. 지표면에서 15.4m 까지는 비교적 풍화를 많이 받는 연암구간이, 그 하부는 신선견고한 흑운 모호상편마암으로 구성되어 있다.

본 공 굴착시 확인된 바에 의하면 지표면하

Table 3. Specific Capacity of each well by Single v.s Group Pumping Tests

Hole no.	Pumping Rate (m^3d^{-1})		Static Water Level (지표하, m)		Dynamic Water Level (지표하, m)		Specific capacity (m^3d^{-1})		Transmissivity (m^2d^{-1})	Storativity
	Single	Group	Single	Group	Single	Group	Single	Group		
P-1	336	247	0	0	48.65	43.01	6.9	5.7	5.36 1.77 Ave. 3.57	5.87×10^{-4}
P-2	240	205	6.9	8.5	35.65	37.80	8.3	7.0	3.89 3.80 Ave. 3.85	4.22×10^{-3}
P-3	210	140	2.4	0	37.36	37.35	5.6	3.7	3.52 1.36 Ave. 2.44	3.42×10^{-4}

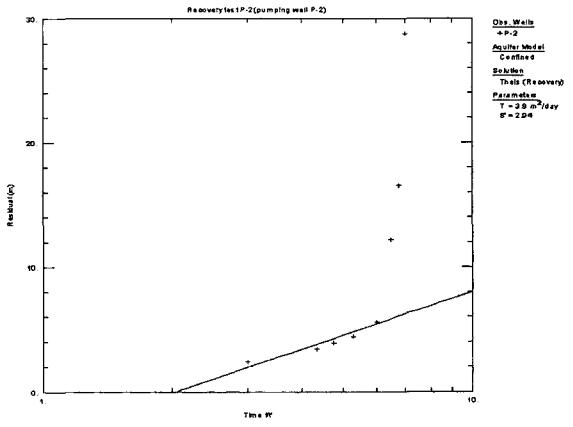
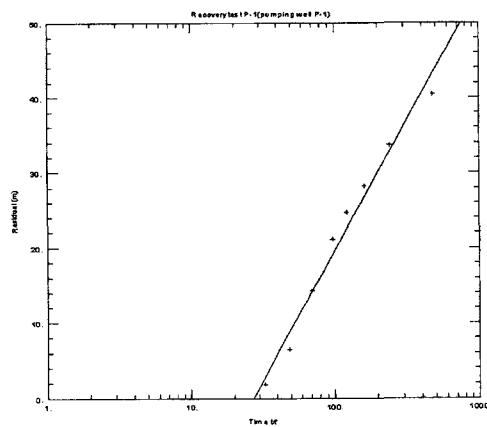
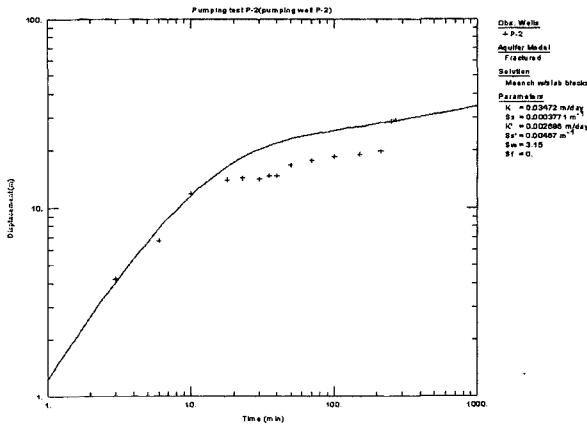
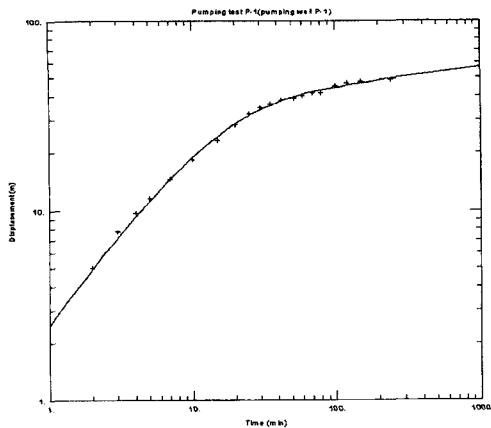


Fig. 2. Drawdown curve at P-1 well after hydrofracturing

25m~36m, 58m~70m 및 95m~104m 지점에 2차 유효공극인 불연속면이 발달되어 있으며, 이는 대수대의 역할을 한다. 수압파쇄시 패커 설치지점을 선정하기 위하여 실시한 우물검증결과, 쟁정시 확인된 파쇄대구간과 매우 잘 일치한다. 쟁정굴진시 간이로 측정한 각 심도별 산출량은 25m~30m 구간이 약 $20\text{m}^3\text{d}^{-1}$ 규모였고, 98m~100m 굴진시 산출량은 $120\text{m}^3\text{d}^{-1}$ 정도로 본 공굴착후 간이 측정한 산출량은 $140\text{m}^3\text{d}^{-1}$ 규모였다 (Table 1 참조).

(2) 수압파쇄후 산출량

본 공에서 single packer 공법을 이용하여 지표하 24m, 60m, 96m에 8" 패커를 설치한 후 초기압력 200 bar와 150 bar로 수압파쇄를 시킨 결과는 Table

Fig. 3. Drawdown curve at P-2 well after hydrofracturing

2와 같다.

공내 24m 하부 구간은 주입율 10l/s ($864\text{m}^3\text{d}^{-1}$)로 청수를 150 bar로 주입시킨 바 6분 55초 후에 주입압은 0 bar로 하강하였다. 60m 구간은 주입율 5l/s ($432\text{m}^3\text{d}^{-1}$)의 율로 200 bar 압력으로 주입한 바, 주입 후 12분 30초 후에 주입압은 0 bar로 강하하였는데 이때 상당량의 갈색의 지하수와 회색 스파임이 지표로 용출되었다. 96m 구간은 주입율 4l/s ($345\text{m}^3\text{d}^{-1}$) 율로 청수를 150 bar 압력으로 주입한 바, 주입 후 14분 20초 후에 그 압력이 100 bar로 하강하였다. 본 공에서 인공수압파쇄 작업전에 실시한 대수성 시험결과 확인된 산출량은 $140\text{m}^3\text{d}^{-1}$ 이었으나 수압파쇄후 대수성시험시 확인된 최종산출량은 $240\text{m}^3\text{d}^{-1}$ 로서 산출량

은 약 42% 정도 증가되었다. 수압파쇄후 8시간 동안 대수성시험을 실시한 바 본 공의 비양수량은 $8.3\text{m}^3\text{d}^{-1}$ 이였고, 평균투수량계수는 $3.85\text{m}^3\text{d}^{-1}$, 평균수리전도도는 0.034md^{-1} , 평균저유계수는 4.22×10^{-4} 였다(Table 3 및 Fig. 3 참조).

(다) P-3 공

(1) 지하지질과 초기 산출량

본 공은 우정병원 배후측 굴착면에 설치한 심정으로 총 굴착심도는 111m이다. 지표에서 3m까지는 Ø14"로 굴착하여 Ø10"의 SS 우물자재를 설치하였으며, 그 하부인 3m~111m 구간은 Ø8"로 굴착하여 나공상태로 심정을 형성시켰다.

P-3공의 지하지질은 0m~3m 까지는 MW 정도의 연암으로 구성되어 있으며, 3m~111m 구간은 신선견 고한 흑운모호상편마암으로 이루어져 있다. 패커의 장착지점을 결정하기 위하여 실시한 정호 검증결과는 지표하 19m~22m와 46m~54m 및 80m~85m 사이에 2차 유효공극인 파쇄대가 잘 발달되어 있으며, 착정굴진시 간이로 측정한 각 심도별 지하수 산출량은 Table 1과 같이 $100\text{m}^3\text{d}^{-1}$ 규모였다.

(2) 수압파쇄후 산출량

본 공은 P-1심정 수압파쇄후 1993년 3월 30일에 지표하 12m, 42m 및 78m 구간에 single packer를 설치하여 초기압력 150 bar로 시작하여 수압파쇄를 시켰다. 그 결과는 Table 2와 같다. 수압파쇄시 공내 12m 하부구간은 평균 주입율 10 l/s ($864\text{m}^3\text{d}^{-1}$)로 약 6분 50초 동안 청수를 주입한 바 주입압이 25 bar로 하강하면서 갈색의 지하수가 공외로 토출되었으며, 42m 하부구간은 주입율 6.2 l/s ($535.7\text{m}^3\text{d}^{-1}$)로 연속 주입을 시킨 바 약 9분 30초 후에 주입압이 55 bar로 하강하였다.

78m 구간 하부는 주입율 7.3 l/s ($630.7 \text{ m}^3\text{d}^{-1}$)로 청수를 주입시킨 바 8분 후에 주입압이 60 bar로 하강하였는데 측정 당시 측정한 산출량은 $100 \text{ m}^3\text{d}^{-1}$ 이였으나 인공수압파쇄작업 후 산출량은 $210 \text{ m}^3\text{d}^{-1}$ 였다. 따라서 인공수압파쇄로 인해 산출량 증가효과는 110% 정도이다.

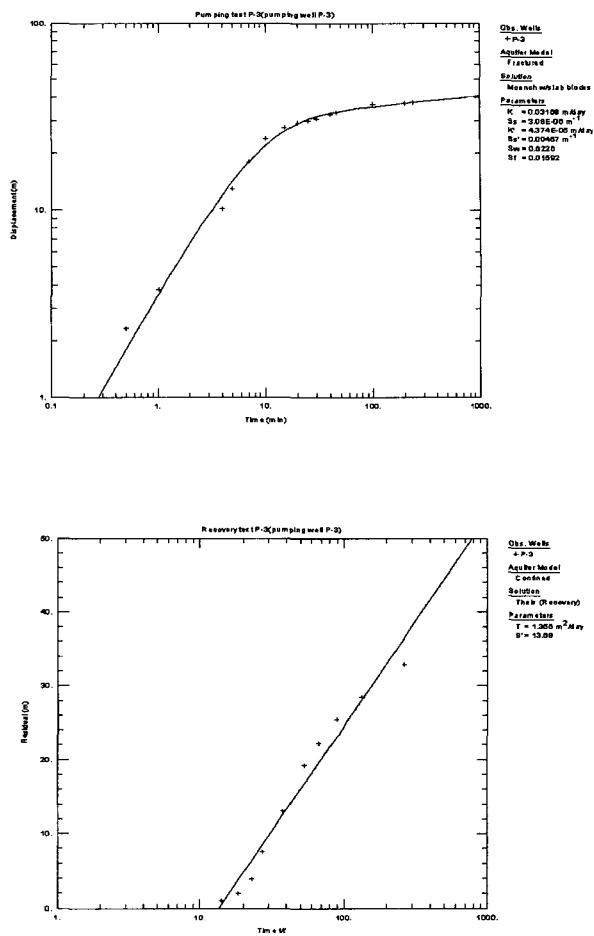


Fig. 4. Drawdown curve at P-3 well after hydrofracturing

본 공의 자연수위는 지표하 2.35m였으며, 인공수압 파쇄 작업을 실시한 후에 260분 동안 실시한 대수성 시험결과에 의하면 본 공의 평균투수량계수는 $2.44\text{m}^2\text{d}^{-1}$ 이며, 평균수리전도도는 0.022md^{-1} 이고, 평균저유 계수는 3.42×10^{-4} 정도였다. $210\text{m}^3\text{d}^{-1}$ 의 지하수를 채 수시 수위는 지표하 37.36m에서 안정되었기 때문에 본 공의 비양수량은 $5.6\text{m}^3\text{d}^{-1}$ 규모이다(Table 3 및 Fig. 4 참조).

(라) 군정시험과 수리적인 연결성 검토

1993년 4월 14일에 각 시험정에 대한 대수성시험을 완료한 후에 지하수위가 완전히 자연상태로 회복된 후

Table 4. Response Time in Observation Wells stressed by near-by Test Well

Test Well	Observation Well	Distance(m)	Response Time (min)
P-1	P-2	59	5
P-2	P-3	51.5	230
P-3	P-1	85	5

에 3개 시험정을 동시에 채수하면서 군정시험을 실시하였다. 각 시험정별 채수량과 시험당시의 자연수위, 동수위 및 초기대수성 시험시의 비양수량과 군정시험 시 비양수량은 Table 3과 같다.

Table 3에서 볼 수 있는 바와 같이 초기의 단정대수성 시험시 각 시험정의 비양수량에 비해 3개 시험정을 동시에 채수했을 시 비양수량은 모두 감소하였는데 이는 각 시험정이 수리적으로 연결되어 서로 간섭현상을 받고 있음을 의미한다.

단정 시험시 관측정으로 사용한 각 심정에서 시험정의 채수로 인해 수위강하가 발생한 각 관측정에서 초기 반응시간은 Table 4와 같다.

Table 4에 의하면 P-3 시험정과 P-1 관측정 사이의 거리가 가장 원거리임에도 불구하고 P-3 시험정에 응력을 가했을 시 P-1 관측정에서 초기 반응이 가장

빠르게 일어난 이유는 본 역에 분포된 기반암의 주파쇄대 방향인 N20W와 동일하기 때문에 투수성이 가장 양호한 지질구조대가 발달되어 있기 때문으로 해석된다. 따라서 본 역에 분포된 암반지하수의 주흐름 방향은 북서방향임을 암시하고 있으며, 3개 시험공은 인공수압파쇄 작업 이후에 수리적으로 완전히 서로 연결되었음을 암시한다.

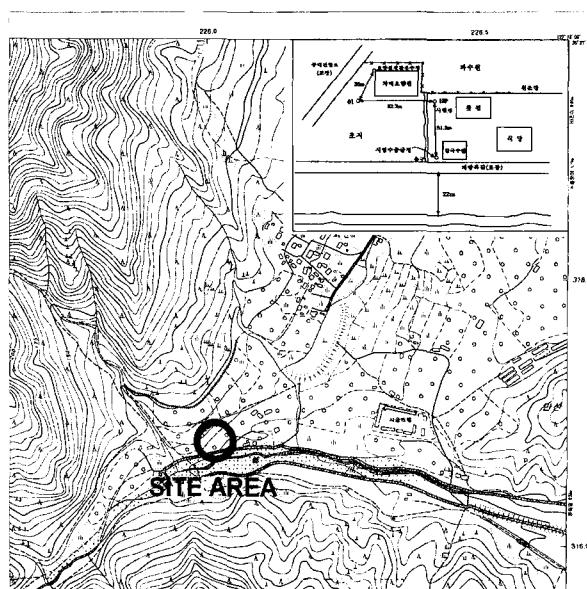
사례 2. 우물 양수량 증대를 위한 수압파쇄효과

본 공은 대전광역시 유성구 덕명리의 대전유성컨트리클럽(골프장)의 남방 1km 지점 수동마을 인근의 매몰된 화산방죽 남측에 소재하는 관정으로서 본 역에는 4개의 암반관정이 설치되어 있다.

(가) 지형과 지질

시험부지는 쥐라기의 조립질 복운모화강암 분포지로 이 암층은 비교적 풍화에 약하여 저구능지를 이루며, 기복이 잘 발달한 지형을 형성하여 임상이 양호하고 평탄지는 과수원과 농경지로 이용되고 있다. 도덕봉, 백운봉 및 금수봉을 이루는 상대적으로 경사가 급한 비탈면을 구성하고 있는 산 정부는 치밀 견고한 흥색장석화강암이 북북서 방향의 맥상으로 관입 분포하고 있어 이 부근의 지세를 지배하고 있다. 흥색장석화강암은 풍화에 강하여 토피가 얇고 노두가 많이 나타나고 있으므로 강우시 유출율이 매우 높은 반면, 복운모화강암은 풍화에 약하여 토피의 심도는 깊으나 토사의 유실이 심하여 하천은 강수후 바로 메마르게 되므로 건천(乾川)이란 명칭이 유래되었다.

현재의 하상 부근은 강우시 토사의 유출로 토피가 2m 정도로 얕거나 아예 기반암이 노출된 부분이 많다. G-1 우물 부근은 과거에는 유로였으나 근래에는

**Fig. 5. Location map and test wells.**

하천 범람원으로, 지하 8m 까지 하상 자갈과 모래층이 분포하고 그 하부 3m 정도까지 완전히 풍화된 토사층이 분포하고 있다.

본 공은 백운봉(542m)에서 북동 45~60 방향으로 발달된 2차수 계곡의 입구에 위치하고 있다.

(나) 공내 TV 검증과 우물현황조사

본 공의 지질주상도가 가용치 않아 본 공의 우물구조와 주대수대의 분포구간 및 인공수압파쇄 수행시 패커 장착지점을 파악하기 위하여 공내 TV검증을 실시하였다. 본 공은 지표하 11m 지점까지 직경 200mm의 무공관 우물자재가 설치되어 있고, 우물의 굴착심도는 총 110m라고 하나 TV검증시 측정된 심도는 총 102m 였다.

TV 검증결과 지표하 15m~29m 사이와 50m 및 100m 구간에 수평 및 수직균열이 잘 발달되어 있었으며, 표면은 적갈색 철성분으로 피복되어 있었다. 뿐만 아니라 본공에 설치된 수중모터펌프(2HP, 양정 30m/80 l /분, 70m/40 l /분, 구경 32m/m 8단, 220V, 60Hz, PS-1012H)와 압상파이프를 인양한 바, 압상파이프 표면은 biofouling 현상인 철박테리아에 의한 피막으로 완전히 피복되어 있었으며, 그 두께는 3mm 이상이였다. 지표하 11m 하부구간은 직경 200mm의 나공상태이다.

(다) 인근우물과 주입수원(注入水原)

G-1 시험정 남방 51.2m 지점에 직경이 200mm이며, 심도가 160m인 심정이 위치하고 있어 이 공에서 채수가능한 지하수($400\text{m}^3\text{d}^{-1}$ 규모)를 주입수원으로 이용하였다. 또한 G-1 시험정 서측 82.7m 지점에 위치한 치매요양원에 관측정이 소재하고 있어 G-1 시험정에서 인공수압파쇄 작업시 인공파쇄의 영향범위와 영향시간을 파악하기 위하여 이 공에 수위측정기(Diver)를 설치하였다.

(라) 인공수압파쇄작업과 시험

(1) 사전 대수성시험

2002년 1월 30일에 공내에 기 설치된 2HP 수중모터펌프를 이용하여 인공수압파쇄 개시 이전 상태에서의 대수대의 수리특성을 규명하기 위하여 사전대수성 시험을 실시하였다. 이때 채수율은 $75.61 \text{ l}/\text{분}(109\text{m}^3\text{d}^{-1})$ 으로 총 123분 동안 양수하였다.

지하수 채수 이전의 자연수위는 지표하 5.31m였고, 채수시 동수위는 지표하 13.79m로서 수위강하량은 8.48m 였다. 따라서 본 공의 비양수량은 약 $8.92 \text{ l}/\text{분}/\text{m}(12.84\text{m}^3\text{d}^{-1})$ 이다(Table 5 및 Fig 6의 (a) 참조).

시간-수위 강하곡선을 이용하여 분석한 본공의 평균 투수량계수와 저유계수는 Table 5와 같이 각기 $17.43 \text{ l}/\text{분}/\text{m}(16.83\text{m}^3\text{d}^{-1})$ 와 2.4×10^{-5} 이었다.

Table 5. Variations of Hydraulic Parameters by Hydrofracturing

Test Stage	Pumping Rate (m^3d^{-1})	Groundwater Level(m)			Specific Capacity ($\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$)	Transmissivity ($\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$)	Storativity	Comparison
		Static Water Level (BGL)	Dynamic Water Level (BGL)	Drowdown (m)				
Before	108.88	5.31	13.79	8.48	12.9	16.6 17.1	1.7×10^{-5} 3.1×10^{-5}	
	Average	-	-	-	-	16.8	2.4×10^{-5}	
After	139.78	4.55	11.59	7.04	19.9	26.4 26.8	2.55×10^{-5} 4.05×10^{-5}	채수율 : +28.4% S.P : +64.3% T : +58.1% S : +37%
	Average	-	-	-	-	26.6	3.3×10^{-5}	

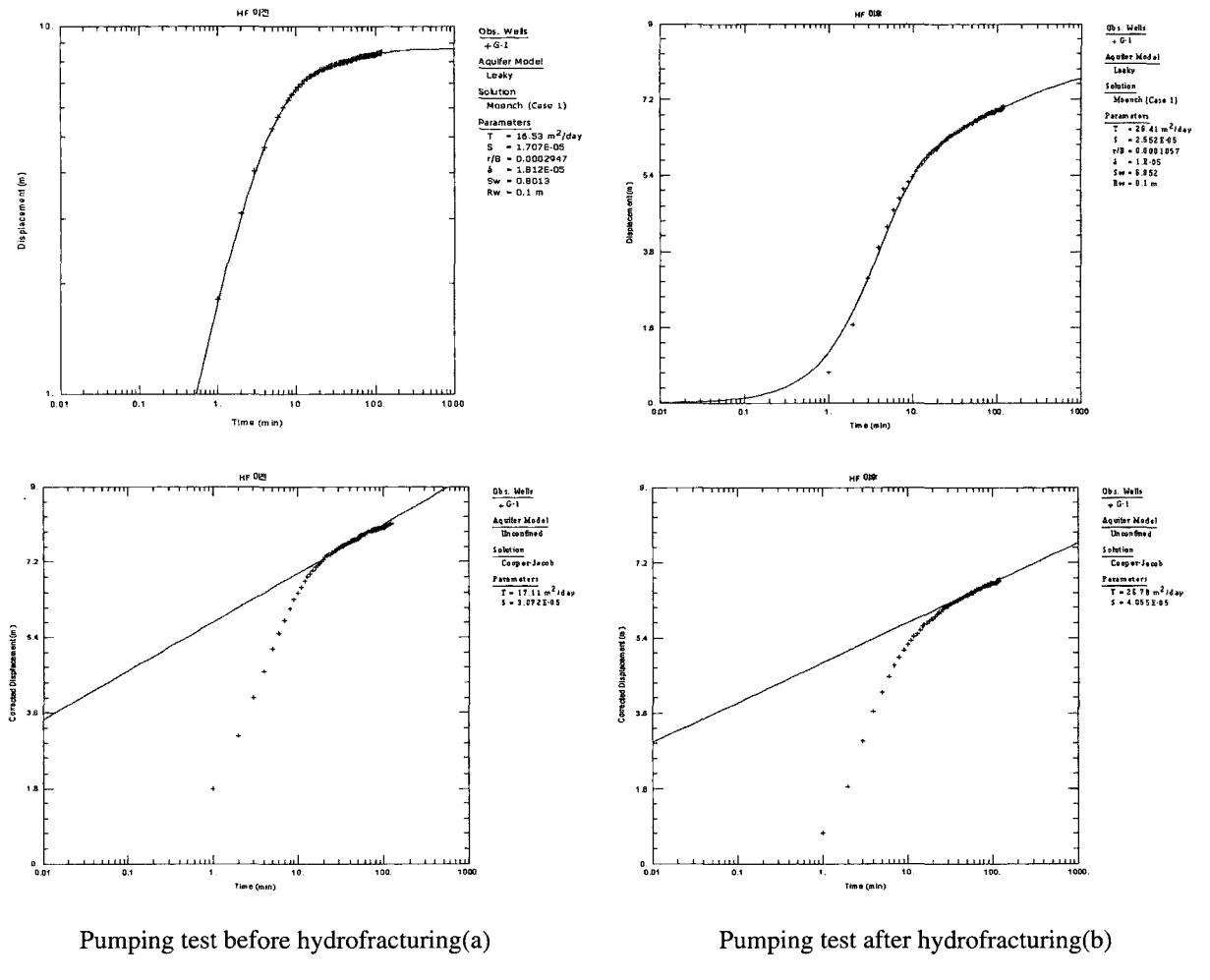


Fig.6. Drawdown curve before and after hydrofracturing at G-1 well

(2) 인공수압파쇄시험

2002년 1월 31일에 G-1공의 공내 30m 지점에 직경 8"의 인장형 FRAC-PACKERTM을 설치하고 수동식 유압 확장펌프를 이용하여 500 bar까지 패커를 확장시킨 후 장착하였다.

인장패커를 설치한 다음 15시 23분부터 15시 37분 까지 약 10분간 주입압을 서서히 상승시키면서 약 4.37m^3 의 지하수를 주입시킨 바, 시간별 주입압의 변화곡선은 Fig 7과 같다. 1차 인공수압파쇄 시험 실시 후 압력펌프의 가동을 중지시키고 wellhead valve 중 안전밸브를 열어본 바 지하수가 공외로 약 3분간 용출 하였다.

Fig 7에 나타난 바와 같이 주입개시 후 4분 40초 후에 주입압은 최고압인 25 bar까지 급격히 상승한 후 그 이후부터 서서히 감소하였다. 이와 같은 현상은 지표하 30m 이하구간에서 인공파쇄가 발생했음을 암시하는 것이다.

Fig 8는 G-1공에서 인공수압파쇄 시험을 실시하는 동안 인근 치매 요양원에 위치한 관측정에서 측정한 수위와 온도변화이다. 인공수압파쇄를 1월 31일 오후 3시 23분에 개시한 후 57분 후인 오후 4시 20분부터 G-1공과 82.7m 상거한 상류구배구간에 위치한 관측정에서 수위가 서서히 상승하기 시작하였고, 주입개시 1시간 13분 후에는 최대 0.56m까지 상승후 서서히

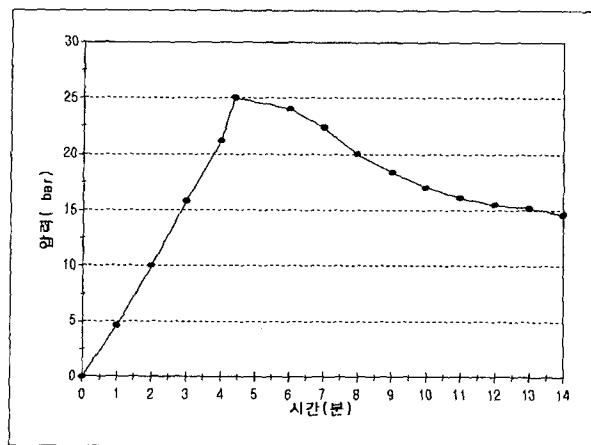


Fig. 7. Hydrofracturing pressure variation at G-1 well

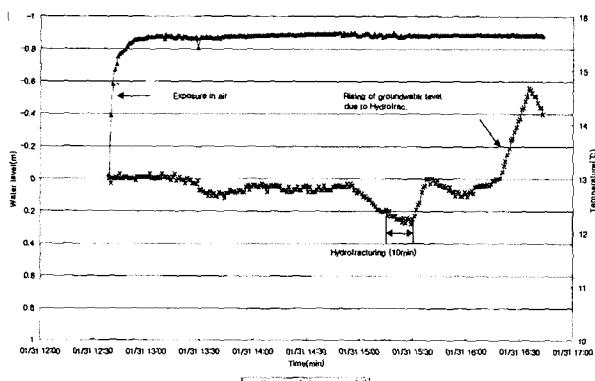


Fig. 8. Time dependant variation of groundwater level and temperature at well near by sanatorium

하강하였다.

Fig 8에 나타난 바와 같이 인공수압파쇄 작업을 실시하기 이전 단계에서도 지하수위가 강하한 것은 관측 정과 35m 상거한 치매 요양원에서 지하수를 채수했기 때문에 발생한 것이며, 온도가 상승한것은 수위측정기를 인공수압파쇄용 G-1공에서 인양한 후 관측정(O1)에 설치하기까지 대기상에 노출된 상태였기 때문이다.

(3) 사후 대수성시험

인공수압파쇄시험 종료후 공내에 설치한 인장폐커를 수축시킨 후 인양한 다음 수중모터펌프를 공내 48m

지점에 설치한 후 2002년 1월 31일 오후 6시 34분부터 사후 대수성시험을 약 2시간동안 실시하였다. 양수 시험 초기에 토출구에서 물색깔은 백색 흙탕물 빛이었으나 약 1시간 후에는 물색깔이 맑은 상태로 회복되었으나 날이 어두워서 정확하게 물빛이 맑아진 시간을 측정하지 못하였다.

사후 대수성시험시 채수율은 사전대수성 시험의 채수율보다 28.4% 증가한 $97.07 \text{ l}/\text{분}$ ($140 \text{ m}^3 \text{d}^{-1}$) 규모로 122분 동안 실시하였다. 이때 양수개시 전 자연수위는 지표하 4.55 m 이였고, 수위강하량은 7.04 m 로서 사후 대수성시험시의 비양수량은 $13.8 \text{ l}/\text{분}/\text{m}$ ($19.9 \text{ m}^3 \text{d}^{-1}$)이다.

또한 이때 취득한 시간-수위강하 곡선을 이용하여 분석한 본공의 투수량계수는 $18.5 \text{ l}/\text{분}$ ($26.64 \text{ m}^3 \text{d}^{-1}$)이고, 저유계수는 3.3×10^{-5} 이였다(Table 5 및 Fig 6의 (b) 참조).

(마) 시험결과

Table 5를 보면 인공수압파쇄 실시전 G-1공의 자연수위는 지표하 5.31 m 였으나, 인공수압파쇄 실시로 인해 자연수위가 지표하 4.55 m 로 상승하여 전체적으로 지하수위는 0.76 m 상승하였다. 이는 potential head가 기존의 파쇄대 보다 최소 0.76 m 높은 인근 파쇄대와 수리적으로 연결, 확장되었음을 의미한다.

인공수압파쇄 실시전 G-1공의 비양수량은 약 $8.9 \text{ l}/\text{분}/\text{m}$ ($12.9 \text{ m}^3 \text{d}^{-1}$)이였으나, 인공수압파쇄 실시 후의 비양수량은 $13.8 \text{ l}/\text{분}/\text{m}$ ($19.9 \text{ m}^3 \text{d}^{-1}$)로서 약 64.3% 증가하였다.

인공수압파쇄 실시이전 G-1공의 투수량계수는 $11.7 \text{ l}/\text{분}/\text{m}$ ($16.8 \text{ m}^3 \text{d}^{-1}$)였으나, 인공수압파쇄 실시후의 투수량계수는 $18.5 \text{ l}/\text{분}/\text{m}$ ($26.6 \text{ m}^3 \text{d}^{-1}$)로서 약 58.3% 증가하였다.

인공수압파쇄 실시이전의 G-1공의 저유계수는 2.4×10^{-5} 이였으나, 인공수압파쇄 실시후의 저유계수는 3.3×10^{-5} 으로 약 37%가 증가하였다.

G-1공에 25 bar의 압력으로 약 4.37 m^3 의 주입수를 주입했을 때 G-1공과 82.7m 상거하여 상류구배구간에 소재한 관측정의 수위가 주입개시 57분 후부터 상

승하기 시작하였다.

인공수압파쇄 실시 이전의 G-1공에서 채수율은 $75.6 \text{ l}/\text{분} (109\text{m}^3\text{d}^{-1})$ 이였으나, 인공수압파쇄 실시 이후의 채수율은 $97.1 \text{ l}/\text{분} (140\text{m}^3\text{d}^{-1})$ 으로 약 28.4%가 증가하였다.

이와 같은 사실은 본공의 지표하 30m 하부에 발달되어 있는 기존의 분리되던 있던 파쇄균열들이 인공수압파쇄로 인해 수리적으로 서로 연결되어 지하수의 저유성과 산출능이 증대되었음을 정량적으로 제시하는 증거이다.

3. 결 론

인공수압파쇄기법은 석유착정산업에서 오래전에 개발되어 보편적으로 사용되는 기술이나 지하수 착정분야에 적용되기 시작한 것은 미국에서도 10수년전부터이다. 이는 석유착정공의 공당 개발단가가 훨씬 고가이기 때문이기도 하지만 기술의 보급에 시간이 소요된 때문이다.

현실적으로 수질은 양호하나 수량이 부족하여 방치된 폐공의 숫자가 무시하지 못할 정도에 이르러 원상복구에 따르는 경제적 손실은 고사하고 신규 수원을 개발하기 위한 막대한 국민적 부담을 경감시키고 환경을 보전하기 위해서라도 기 개발된 지하수관정을 최대한으로 활용토록 노력하여야 할 것이다.

본 논문에서는 연구의 초기단계로 화강암 지역에서의 Dewatering 과 양수량 증대 사례를 소개하였지만 인공수압파쇄기법은 지열이용, 오염관정의 정화 및 쓰

래기 매립장의 정화사업 등 응용범위가 매우 넓은 원천적인 기술이다. 한국에서는 아직 원초적인 기술이 정립되지 아니하여 소수의 장비가 이미 10여년 전에 도입되었으나, 그 활용은 답보상태 내지 중단상태에 있는 실정이다. 따라서 본 연구를 통하여 지하수 양수량 증대를 위한 인공수압파쇄 기술의 기초적인 기술을 정립하고 연구가 진척됨에 따라 타 분야에로의 적용 가능성을 제시코져 하는 것이다.

4. 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발단의 연구비 지원(과제번호 3-4-1)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 건설교통부, 지하수조사연보, 301~312p, 2001.
- 한서엔지니어링, 우정병원 신축부지의 지하수개발 및 Deep well Dewatering system 보고서, 1~124p, 1993. 4.
- 한정상, 인공수압파쇄를 이용한 저산출 관정의 산출량 증대기술에 관한 연구(미발간).
- BASKI, Catalog 5, 5~6p.
- Glenn W. Stewart, Hydraulic Fracturing of Drill Water Wells in Crystalline Rock of New Hampshire, 1978.