

인공수압파쇄기법에 의한 지하수 양수량 증대(II)

한정상¹ · 안종성² · 윤윤영^{2*} · 이주형² · 전재수² · 김은주² · 김형수³ · 백건하³ · 원이정³

¹연세대학교 지구시스템과학과, ²(주)한서엔지니어링, ³한국수자원공사 수자원연구소

Improvement of Groundwater Well Recovery by Hydrofracturing

J.S. Hahn¹ · J.S. Ahn² · Y.Y. Yun^{2*} · J.H. Lee² · J.S. Jeon² · E.J. Kim² ·
H.S. Kim³ · G.H. Baek³ · E.J. Won³

¹Dept. Earth System Sciences, Yonsei University, ²Hans Engineering CO., Ltd, ³Korea Water Institute

ABSTRACT

To increase the yield from groundwater wells in various rock types by hydrofracturing, tests of 12 wells were carried out as a part of sustainable groundwater development and artificial recharge project. Test wells are selected 5 wells in Jurassic granites, 2 wells in Cretaceous volcanics, 4 wells in Cretaceous sedimentary rocks and one well in Pre-Cambrian gneiss. The results show that specific capacity of 11 wells increased about 7% to 366%, while a well in Cretaceous sedimentary rock decreased about 43.4% owing to plugging of fault clay. Meanwhile, impact distances influenced due to hydrofracturing ranged from 5.4 m to 82.7 m from the test wells, actual drawdown data measured during the pumping test after hydrofracturing are more or less decreased and reveals balanced drawdown.

Key words : Hydrofracturing, Specific capacity, Impact distances

요약문

지속적인 지하수개발 및 합양기술 사업의 일환으로 각종 암석에서 쟁정의 산출량을 증대시키기 위해서 12개 소의 우물에 인공수압파쇄시험을 실시하였다. 시험정은 쥬라기 화강암 4개 지역에서 5공, 백악기 화산암 2개 지역에서 2공, 백악기 퇴적암 3개 지역에서 4공, 그리고 선캄브리아기 편마암 지역에서 1공을 선정하였다. 12공의 시험정에서 11공은 비양수량이 7%에서 366%까지 증대되었다. 단지 백악기 퇴적암 지역의 1공만이 단층점토의 폐색으로 비양수량이 43.4% 정도 감소하였다. 4개소의 균정지역에서 시험결과는 시험정으로부터 5.4 m에서 82.7 m까지 영향을 미치는 것으로 나타나며, 인공수압파쇄의 영향으로 사후 대수성 시험시 관측정에서 강하 폭은 적어졌지만, 균형잡힌 수위강하현상을 보이고 있다.

주제어 : 인공수압파쇄기법, 비양수량, 영향거리

1. 서 론

국내에서 지하수 자원의 관리는 2가지 측면에서 실시되어야 한다. 첫째는 기존 개발된 우물의 수명연장과 성능유지 · 개선을 통한 국지적 관리이고, 두번째는 안정성 · 경제성이 있는 신규개발에 의한 광역적 관리이다. 본 연

구는 전자에 해당하며, 다반사로 당면하지만 실용적 측면에서 이론적 · 기술적 세부사항은 미비된 상태이다.

2001년 12월말 국내 지하수 관정은 총 1,077,697개이며, 그 중 산출량이 1일 30 m³ 미만인 우물이 46%인 495,551 개소이다¹⁾. 2001년 말 현재 약 208만명이 이용하는 10,964 개소의 간이상수도의 약 76.3%인 8,478개소가 지하수를 수

*Corresponding author : geohans@chollian.net

원고접수일 : 2003. 5. 28 계재승인일 : 2003. 9. 19

질의 및 토의 : 2003. 12. 30 까지

원으로 하고 있으며²⁾, 그 중에서 약 49.9%가 '80년도 이전에 설치된 노후된 우물로 시급한 개선이 필요한 상태이다. 또한 '80년대에 2,249개소(20.2%), 90년대 전반에 1,833(16.5%)개소, 후반에 1,330개소(12.0%)가 설치 사용중에 있어 10년 이상 노후된 우물이 88%를 점하고 있다.

한편, 2000년 말 현재 45,938개소의 폐공 중 순전히 수량부족으로 폐공된 우물이 13,567개소로서 약 29.5%인 실정이다³⁾.

이와 같은 기존 저산출 관정들에 대해서는 국내 암반 대수총에 부합되는 인공수압파쇄기법을 적용하여 신출능을 증대시킬 수 있음은 물론, 신규 지하수 개발 시 쟁정 장비의 접근성의 제한 등으로 최적의 위치에서 관정을 설치할 수 없어 초래되는 산출수량의 부족 시에도 이 기법의 적용이 가능하다.

지하수 개발 시에 산출량을 증대시킬 목적으로 공내 발파, 열처리 및 Dry ice법이 시도되었으나 열처리나 Dry ice법은 초보단계를 벗어나지 못하였고, 유정 내 가스를 이용한 발파법은 상당히 정교한 단계에까지 개발되었으나 위험성 등의 한계로 개발이 중단된 상태이다. 그러나 우물 주변에 밀착된 파쇄균열을 효율적으로 비교적 안정하게 이완·개구시키는 인공수압파쇄법은 꾸준하게 개발되어 지하수 산업에 이용되게 되었다⁴⁾.

국내에서는 1989년도에 상업적 목적으로 인공수압파쇄 장비가 도입되어 온천 및 지하수개발 시 산출능 증대에 이용하였고, 연이어 2~3대의 장비가 추가 도입되었다.

처음 도입된 미국의 Kyle사 장비는 2대의 3연식 피스톤 펌프를 유압모터로 구동시켜 3,500 psi(245 kg/cm²)의 압력에 1,000 l·min⁻¹의 토출량을 갖는 지하수 산출량 증대 전용으로 개발된 장비였으나, 30여개소에서 상업운전 결과 실패로 종결되었다. 1년 후에 현 농업기반공사에서 도입한 ATLAS COPCO사의 HFU 140 장비는 140 bar의 압력으로 350 l·min⁻¹의 토출량을 갖는 장비였으나, 시운전시 발생된 경미한 안전사고^(?)로 사용이 중단되었다. 현재는 같은 시기에 민간업자가 도입한 ATLAS COPCO사의 장비가 상용으로 가동 중에 있으나, 암종이나 지질 상태와 결부된 증대자료나 가용실적은 전무한 실정이다.

이런 사정으로 본 기법에 대한 연구를 “지속적인 지하수 개발 및 함양기술 개발사업”에 포함하게 되었고, 1차년도 3개소 우물을 포함하여 총 12개소 우물에 대하여 실시한 인공수압파쇄시험의 결과를 시험자료로 제시하는 것이다.

각 시험정에서 실시한 시험은 본 학회지 Vol. 7 No 2에 수록된 동 제목의 보문⁵⁾에서 소개된 2편의 사례와 같은 과정을 거쳐 분석한 것이다.

2. 연구방법

본 연구에서 채택한 인공수압파쇄 연구작업 Protocol은 Fig. 1과 같다.

Fig. 1의 Protocol은 수중모터펌프를 설치하여 사용중인 우물에 대한 것이며, 실제로는 시험대상 우물의 상태에 따라 상기 Protocol에 준하는 작업과정에 의거 현장시험을 실시하였다.

본 연구는 지중에 고압수를 강제 주입하여 기존 열극의 재개구, 확장 및 청소효과 등에 의해 양수량을 증대시키

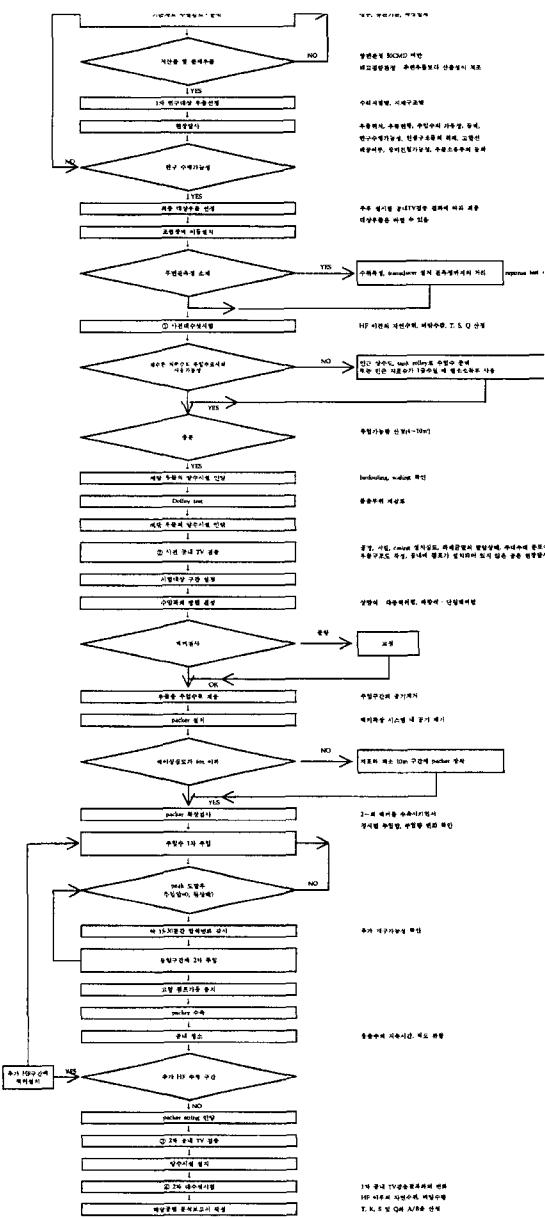


Fig. 1. Flow chart of works (2002, Hahn & Yun).

는 것이 목적이므로 우물의 현재상태의 채수능을 평가하기 위해서 사전 대수성시험을 실시하였고, 인공수압파쇄시험시 팩커의 설치지점을 결정하기 위해서 사전 공내 TV검증을 실시하였다.

인공수압파쇄 시험의 팩커는 인장팩커(Extension packer)와 확장형 팩커(Inflatable packer)를 사용하였는 바, 주로 밀폐구간이 긴 확장형 팩커를 사용하였고, 지층의 파쇄가 극심하여 팩커에 손상을 줄 우려가 있는 곳에서는 인장팩커를 사용하였다.

사후 TV검증은 인공수압파쇄 작업으로 생성된 우물공벽에 변형이나 변위를 확인할 목적으로 시도하였으나, 우물 물의 탁도가 높거나 공내 카메라의 회전으로 동일한 피사체 영상을 얻는 것이 거의 불가능하여 소기의 성과에는 미치지 못하였다.

사후 대수성 시험은 가급적 사전 대수성 시험에서 사용된 장비와 같은 장비로 동일한 조건(양수시간 2~4시간 기준)에서 시험토록 하였다.

원래 시험의 목적에 의하면 사전과 사후 시험시 지하수위 강하를 같게 유지하면서 그 때 증대된 채수량을 측정하여 증대율을 평가하여야 할 것이나, 실제로 지하수위 강하를 동일하게 유지시키는 것은 현장 작업에서는 불가능

함으로, 본 연구에서는 가급적 사전·사후의 채수율을 동일하게 유지한 후 지하수위 강하의 변화로 산출된 비양수량의 증가로부터 양수량의 증대를 평가토록 수행하였다.

3. 시험대상 우물의 선정

서론에서 언급한 바와 같이 시험대상 우물은 1) 우물장을 형성, 2) 저산출 능력우물, 3) 상이한 지질, 4) 상이한 지체구조에 분포하는 것으로 선정기준을 설정하였다.

여기에서 간과할 수 없는 것은 우물 소유주나 관리자가 우물의 손괴를 우려하여 쉽게 동조하지 않을 뿐더러, 설사 모든 조건이 갖추어져 있다해도 5톤 트럭 2대가 진·출입할 수 있는 공간이 있어야 시험이 가능하다는 점이다.

이러한 점을 고려하여 선정한 우물은 Table 1과 같다.

4. 수문지질 단위별 수압파쇄 특성

Fig. 2는 인공수압파쇄시의 전형적인 주입압-주입유량의 시간이력곡선^{6,7)}이다.

여기서 보는 바와 같이 시험구간에 물을 주입하여 압력을 가하게 되면 수분 이내에 암반구간이 파쇄되며, 초기

Table 1. Well Inventory for Hydrofracturing Test

순번	공번	위치	지질	심도 (m)	추정신출량 (m ³ d ⁻¹)	용도	선정사유
1	G-1	대전시 유성구 수동리	쥬라기(?) 복운모화강암	200	100	생활용수	실증시험 검증차 시험
2	IW-4	홍천군 남면 유치리	쥬라기 흑운모화강암	224	40	먹는샘물공장 관측정	군정
3	O-9	포천군 이동면 도평리	쥬라기 복운모화강암	130	30	먹는샘물공장 관측정	군정
4	GW-1	인천시 계양구 득실동	경기편마암 복합체	67	100	경인운하 영향조사용	시험정 1조
5	KYC-11	영천시 괴연동	채약산 빙암층	80	40	지하수기초 조사	화산암
6	KJD-1	진도군 군내면 둔전리	역질옹회암	95	30	농업용수로 사용중	옹회암
7	KYC-3	영천군 화산면 대안리	반야월층 (신라총군)	100	30	지하수기초 조사용	퇴적암
8	KCG-1	칠곡군 지천면 심천리	하산동층 (낙동총군)	188	50	농업용수용	퇴적암
9	KCG-2	칠곡군 지천면 심천리	하산동층 (낙동총군)	250	70(?)	농업용수용	퇴적암
10	KYA-1	영암군 삼호면 서창리	용결옹회암	80	40	지하수기초 조사용	화산암
11	KYS-1	대전시 유성구 안산동	복운모화강암	91	50(?)	건물유지용수	군정
12	KYS-2	대전시 유성구 안산동	복운모화강암	74	80	건물유지용수	군정

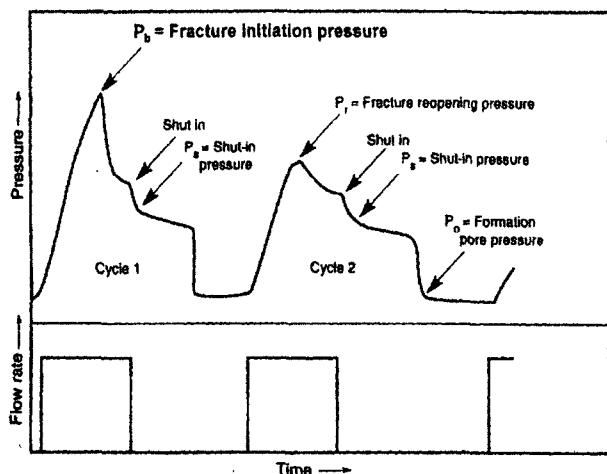


Fig. 2. Time-pressure flow rate diagram.

파쇄(P_b) 이후에 가압을 중지하면 일정한 압력인 균열폐쇄압(P_s)에 도달하게 된다. 이 압력은 균열을 유지시키는데 필요한 압력과 같거나 약간 크기 때문에 대개 균열면에 수직으로 작용하는 최소 수평주응력(S_h)을 나타나게 된다. 즉,

$$S_h = P_s$$

한편, 균열폐쇄이후 다시 압력을 기하기 시작하면 초기파쇄압력(P_b)보다 상당히 낮은 일정한 압력에 도달하게 되는데 이 압력을 균열개구압(P_r)이라 하며, 이로부터 현지의 암반 인장강도(In-situ tensile strength, T_{hf})를 구할 수 있다. 즉,

$$T_{hf} = P_b - P_r$$

Table 2. Hydrofracturing Test Results by hydrogeological Unit

(단위 : MPa)

통계	수문지질단위		최소	0.10	평균	중앙값	0.90	최대	자료수
	전체	최소							
초기파쇄압	전체	2.39	7.14	11.02	10.67	16.43	22.10	129	
	쇄설성퇴적암	7.42	8.69	11.37	10.86	14.70	16.75	20	
	석회암	11.41	11.61	14.75	13.34	19.02	20.91	4	
	변성암	2.39	6.90	11.03	10.98	16.47	19.50	76	
	관입화강암	2.69	6.87	10.23	8.87	14.73	22.10	29	
균열개구압	전체	1.29	3.41	6.25	5.84	9.67	13.82	129	
	쇄설성퇴적암	2.82	4.51	6.62	6.60	8.15	11.40	20	
	석회암	7.08	7.30	9.14	7.83	12.02	13.82	4	
	변성암	1.29	3.50	6.27	5.86	9.95	13.60	76	
	관입화강암	1.86	2.96	5.56	4.81	8.82	13.20	29	
암반인장력	전체	0.83	2.76	4.76	4.49	7.28	9.80	129	
	쇄설성퇴적암	1.79	2.79	4.86	4.62	7.29	8.02	20	
	석회암	4.24	4.27	5.61	5.56	7.00	7.09	4	
	변성암	0.91	2.73	4.73	4.52	7.10	9.80	76	
	관입화강암	0.83	2.76	4.66	4.00	7.98	9.50	29	

Table 2는 18개 대규모 토목건설 사업⁸⁻²⁴⁾에서 지하구조물(터널)의 설계자료로 측정된 인공수압파쇄시험 성과로서 129건의 자료를 수문지질단위별로 정리한 것이다.

Table 2의 결과는 인공지하구조물의 속성상 다양한 지질 및 지체구조구를 망라하지 못하였고, 측정심도 및 자료의 숫자에서 제한은 있다고 사료되나 대체적인 경향을 파악하는데는 큰 무리는 없을 것이다.

Table 2에서 보면 초기파쇄압은 최대치가 화강암에서 22.1 MPa, 쇄설성 퇴적암에서 16.75 MPa이며, 최소값은 변성암에서 2.39 MPa, 석회암에서 11.41 MPa 정도이다.

균열(재)개구압은 최대치가 석회암에서 13.82 MPa, 쇄설성 퇴적암에서 11.4 MPa^o]고, 최소치는 변성암에서 1.29 MPa, 쇄설성퇴적암에서 2.82 MPa로서 충리가 잘 발달된 퇴적암층에서 높은 값을 보이는 것이 이채롭다.

이 자료로부터 양수량 증대를 목적으로 하는 인공수압파쇄의 경우 기존 균열을 개구·확장시키면 충분하므로 장비의 최대 주입압이 약 140 bar 정도면 충분할 것으로 추정된다.

현지 암반의 인장강도는 암종에 따라 차이가 있겠지만 0.83 MPa~9.8 MPa 정도이며²⁷⁾, 초기 파쇄압과 현지 암반 인장강도 간의 상관관계는 Fig. 3에 도시된 바와 같이 $y=0.3878x + 0.4909$ 이다.

한편, 지하수 산출량 증대를 위한 인공수압파쇄의 경우는 균열개구압이 중요한 의미를 갖고 있으므로 현지 암반 인장강도와 상관관계를 도시하면 Fig. 4와 같이 $y = 0.2156x + 3.4147$ 이다.

지하수의 주 유동통로는 지층에 발달된 균열이고, 균열

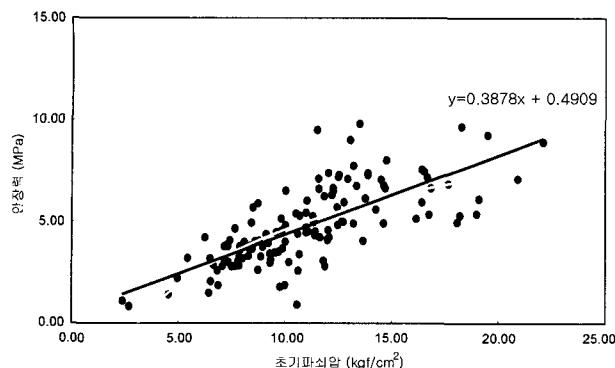


Fig. 3. Correlation between breakdown pressure and in-situ tensile strength.

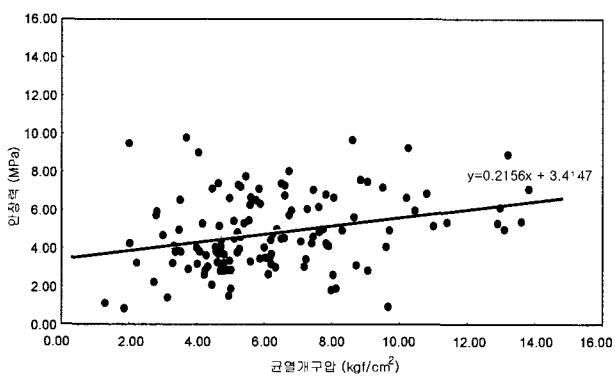


Fig. 4. Correlation between fracture reopening pressure and in-situ tensile strength.

의 분포는 지표 부근에서 가장 많이 분포되며 심도에 따라 감소한다는 것이 정설이다.

Heim(1878)²⁵⁾의 법칙은 수평응력과 수직응력이 같아지는 심도 1 km 정도를 균열발달 한계로 주창한 바 있고, Hoek 과 Brown(1980)²⁶⁾은 대략 500 m 이내에서는 수평응력이 수직응력보다 크므로 절리 등 균열이 발생 가능하나 심도 1 km 이상에서는 균열의 발생은 어려운 것으로 보고하였다.

김수정(2002)²⁷⁾은 학위논문에서 한반도 중앙부에서 균열(절리)의 평균 발생심도는 570 m 정도이나 응력구에 따라 차이가 있어 모량·양산단층 응력구에서는 370 m, 추가령 구조곡 경안단층 응력구에서는 570 m, 중생대 퇴적암 응력구에서는 250 m, 그리고 고생대 퇴적암 응력구에서는 890 m 정도로 기술하였다.

이러한 균열분포 특성으로 심도가 깊게되면 우물의 산출량은 감소하게 되는데, Davis & Turk(1964)²⁸⁾는 미국의 결정질암(화성암 및 변성암)에서 우물심도와 산출량을 조사하여 Fig. 5를 제시하였으며 심도 700 ft(213 m)~1,000 ft(305 m) 보다 깊은 우물은 실용적이 아니라고 기술하였다.

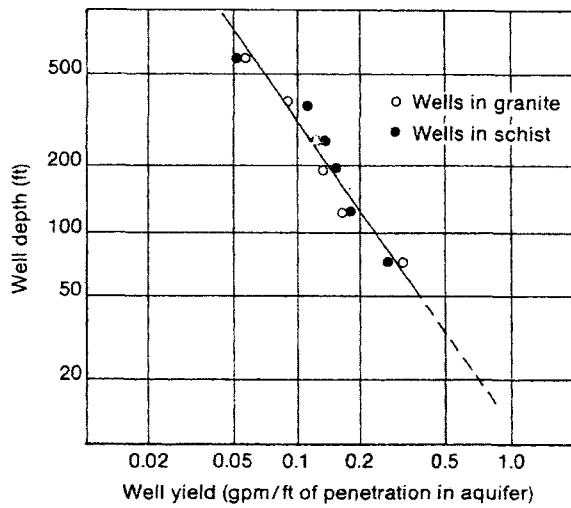


Fig. 5. Well depth vs well yield.

Table 3. Well Depth vs. Percentage of Well Yield

암종	비산출량			자료수
	80%	85%	90%	
편마암류	72	80	88	14
현무암+편마암	75	78	82	9
화강암		불규칙함		5
계				28

한정상(1982)²⁹⁾은 국내에서 28개 우물의 심도와 비산출량을 조사하여 Table 3과 Fig. 6을 작성하였고, 우물심도가 80 m 정도이면 전 산출량의 85% 정도의 물이 산출되므로 우물을 무작정 깊게 파는 것은 비경제적이라고 기술한 바 있다.

또한, 우물의 심도가 증가함에 따라 비양수량의 증가율은 감소하는데 심도 30 m에서는 비양수량은 $0.16 \text{ m}^2 \text{d}^{-1}$ ~ $0.76 \text{ m}^2 \text{d}^{-1}$ 정도이고, 심도 40 m에서는 $0.1 \text{ m}^2 \text{d}^{-1}$ ~ $0.5 \text{ m}^2 \text{d}^{-1}$ 이며, 심도 60 m에서는 $0.04 \text{ m}^2 \text{d}^{-1}$ ~ $0.21 \text{ m}^2 \text{d}^{-1}$ 로 현저하게 그 값이 감소하다가 그 이후 심도에서는 비양수량은 거의 제로(0) 상태여서 2차 유효공극은 거의 없는 것으로 기술한 바 있다²⁹⁾.

이러한 제반사항으로부터 지하수 양수량 증대를 목적으로 하는 인공수압파쇄의 대상구간은 이론상 심도 80 m 정도가 한계이며, 그 보다 깊은 심도에서는 특수한 지질구조가 발달되어 있지 않는 한 그 효과는 특별히 기대되지 않는다.

5. 인공수압파쇄시험

각 시험정별로 주입단계 및 주입차수 별로 주입시간과

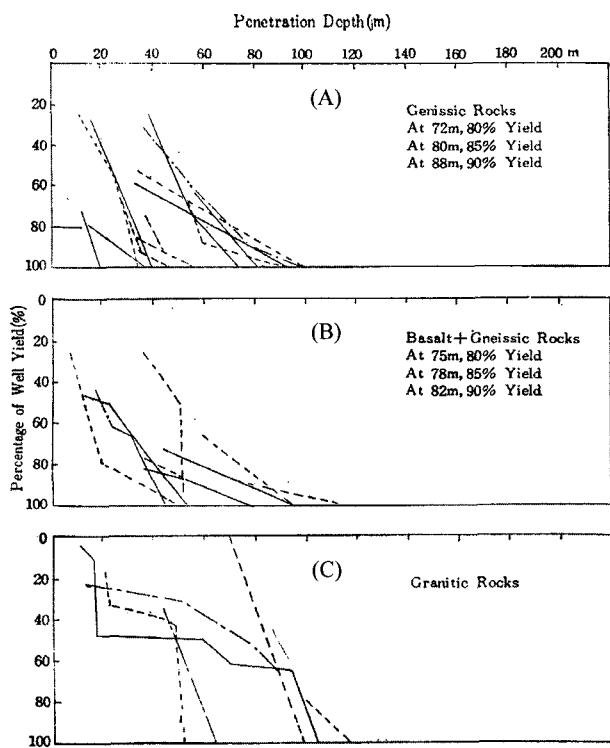


Fig. 6. Well depth vs. percentage of well yield.

최대 주입압은 Table 4에 정리하였다.

Table 4에서 보는 바와 같이 연구에 사용된 고압펌프의 기계성능은 140 bar로 $350 l \cdot min^{-1}$ 의 유량을 공급할 수 있는 장비이지만 실제 현장시험에서는 $63 kg/cm^2$ 가 최대 주입압이었으며, 대부분의 경우 $40 kg/cm^2$ ~ $50 kg/cm^2$ 의 압

력에서 지층의 균열이 파쇄 또는 개구되어 그 틈으로 물이 주입되어 압력이 강하되는 현상을 보이고 있다. 균열의 개구는 주입시작 후 1분 이내에 발생되는 경우가 대부분이었으며, KJD-1과 같은 경우는 약 7분 경과시까지 압력에 뚜렷한 변화를 읽을 수 없었다.

원래 인공수압파쇄시험 시에는 주입시간-주입유량에 대한 정보가 상당히 중요하나 본 연구에 사용된 장비는 지하수관정의 균열확장을 주목적으로 제작된 장비여서 주입시간-주입유량에 대한 자료는 취득하지 못하였다.

6. 인공수압파쇄기법 효과분석

6.1. 양수량 증대

시험 대상공 12공에 대한 사전·사후 대수성시험 결과를 Table 5에 취합하였다.

사전·사후 대수성 시험은 인공수압파쇄시험으로 대상우물의 물리적 상태 즉, 산출량이 얼마나 증대되는가 하는 판단자료의 획득으로 목적이 달성되므로 공히 2~4 시간을 원칙으로 실시하였으며, 기존 자료가 가용한 우물에서는 사전 대수성 시험은 실시하지 않고 기존 자료를 이용하여 분석하였다.

Table 5에서 보면 전체 12공의 시험정 중 11개공의 비양수량이 7%~366.8%까지 증가하여 인공수압파쇄 이전처럼 수위를 강하시킨다면 산출량은 상당히 증대될 것이다.

수문지질단위 별로 보면 쥐라기의 화강암 지역에서는 비양수량의 18.8%~99.6%, 투수량계수가 23.4%~85.2%

Table 4. Time-Pressure Records during Hydrofracturing

공번	팩커 심도 (bgl-m)	I단계						2단계					
		주입회수						주입회수					
		1차		2차		3차		1차		2차		3차	
주입 시간 (초)	주입 압력 (kg/cm ²)												
G-1	30	840	25	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
IW-4	39	360	48	660	52	—	—	27	240	45	—	—	—
O-9	23	120	35	120	35	420	43	—	180	33	420	35	—
GW-1	25	40	40	60	39	60	38	37	180	55	180	57	360
KYC-11	8.5	187	25	210	13.5	288	15	—	—	—	—	—	—
KJD-1	25	200	25	215	25	310	21.9	—	—	—	—	—	—
KYC-3	22.5	50	44.5	258	43.7	200	37.5	—	230	25	130	28.5	240
KCG-1	41.4	300	63	150	48	—	—	47.6	640	49	—	—	—
KCG-2	47.6	240	49	220	49	—	—	34.9	340	39	300	30	—
KYA-1	22.5	240	19	140	6	160	10	—	150	13	300	5	—
KYS-1	13.4	173	20	50	20	30	20	—	180	20	180	15	—
KYS-2	34	130	20	140	12	190	9	—	—	—	—	—	—

Table 5. Productivity Growth Analysis of 12 Wells by Hydrofracturing

시험정	행정구역	위치	수문지질단위 지질분포	채수율 (m ³ d ⁻¹)	지하수위(m)			비양 수량 (m ³ d ⁻¹)	투수량 계수 (m ³ d ⁻¹)	저류계수	비고
					자연수위 (BGL-)	동수위 (BGL-)	수위강하량 (m)				
G-1	대전광역시 유성구 면명동 179-5	127°17'36" 36°20'37"	쥬라기 복운모 화강암	108.88 139.78 +28.7%	5.31 4.55	13.79 11.59	8.48 7.04	12.9 19.9 +64.3%	16.8 26.6 +58.1%	2.4×10 ⁻⁵ 3.3×10 ⁻⁵ +37.1%	양수시
IW-4	강원도 홍천군 남면 유치리 136-5	127°52'51" 37°34'34"	쥬라기 흑운모 화강암 및 우백질 화강암	38.5 48.8 +26.8%	8.12 7.58	55.97 44.11	47.85 36.53	0.80 1.34 +66.1%	0.34 0.61 +77.6%	2.87×10 ⁻⁴ 3.17×10 ⁻⁴ +10.4%	양수시
O-9	경기도 포천군 이동면 도평리 484-1	127°23'11" 38°04'07"	쥬라기 흑운모 화강암	30 50 30.8	4.05 4.55 -	30.15 4.67 -	26.10 0.12 -	1.15 -	0.81 2.53 -	9.43×10 ⁻⁴ 2.88×10 ⁻⁶ -	B-test: '02. 5. 31 실시 O-9 O-10 A-test 실시: '02. 5. 31 O-9 (CTD-Diver 고장? 화란송부 O-10 SW방향(34m 상거) A-test : '02.6.19 재실시 O-9 해석불가(Di245 고장?) 화란에서 송부자료로 해석
GW-1	인천시 계양구 독실동 공구랑골	126°42'9.6" 37°34'19.5"	경기편마암 흑운모편마암 파쇄대 16.7~17 m 단층대(?)	77 62.2 -19.2%	2.24 2.98	35.39 13.11	33.15 10.13	2.322 6.140 164.4%	5.402 2.555 -52.7%		양수시
				- - -	- 2.28 -	- 35.39	- 33.11	- -	6.812 4.891 -18.65%	- -	화복시
		126°42'10.0" 37°34'19.5"	GH-1 18.5 m 단층흔적	- - -	2.03 2.64	17.2 9.25	15.17 6.61	- -	5.082 2.599 -48.9%	1.85e-5 0.0049 26,485%	양수시
				- - -	2.23	9.25	7.02	- -	0.769 3.402 +342.4%	- -	화복시
				- - -	2.08 2.70	3.73 6.17	1.65 3.47	- -	8.922 4.367 -51.1%	0.0092 0.0074 -19.6%	양수시
		126°42'10.4" 37°34'19.5"	GH-2 15.2 m 단층흔적	- - -	- 2.26	- 6.17	- 3.91	- -	8.283 8.632 +4.2%	- -	화복시
				- - -	2.23 2.79	4.66 4.95	2.43 4.95	- -	8.210 5.552 -32.4%	0.004 0.00094 -76.5%	양수시
		126°42'10.0" 37°34'19.2"	GH-3 27.4m 단층점토 협재 34m 활경면	- - -	- 2.36	- 7.74	- 5.38	- -	5.873 4.926 -16.1%	- -	화복시
				- - -	4.10 3.56	9.78 8.28	5.68 4.72	0.03 20.63	5.23 6.02	7.3×10 ⁻⁴ 7.35×10 ⁻⁴	양수시
KYA-1	영암군 독천면 서창리	X:136,784.5 Y:158,22.5	용결옹회암 21~21.3m 24~80.5m: 유공관 대비(%)	40 40	3.97 2.78	7.36 5.03	3.39 2.25	-	7.0 8.31 18.71	1.87×10 ⁻⁵ 9.63×10 ⁻⁵ 414.97	양수시
				- -	- -	- -	- -	-	- -	-	
			KYA(O) 대비(%)	- -	2.77 3.50	3.27 4.49	0.5 0.99	-	6.44 7.34 13.96	2.66×10 ⁻³ 7.65×10 ⁻⁴ -71.24	양수시
			KYA-1 대비(%)	- -	4.48 5.10	9.78 8.26	5.30 3.18	-	7.72 6.46 -16.32	- -	화복시
			KYA(T) 대비(%)	- -	3.97 2.78	7.36 5.03	3.39 2.25	-	9.85 11.33 15.03	- -	화복시
			KYA(O) 대비(%)	- -	2.98 3.50	3.27 4.49	0.29 0.99	-	17.35 16.95 -2.31	- -	화복시
KSY-1	대전시 유성구 안산동	X:324,044 Y:226,925.0	복운모화강암 7.85~11.3m 36.6~38.9m 69.5~76.0m 대비(%)	30.5 40.0 31.4	5.37 3.2	13.69 12.38	8.32 9.18	3.67 4.36	1.55 2.31	4.6×10 ⁻³ 1.17×10 ⁻⁴	양수시

Table 5. Continued

시험정	행정구역	위치	수분지질단위 지질분포	채수율 (m ³ d ⁻¹)	지하수위(m)			비양 수량 (m ³ d ⁻¹)	투수량 계수 (m ³ d ⁻¹)	저류계수	비고
					자연수위 (BGL-)	등수위 (BGL-)	수위강하량 (m)				
KSY-2	대전시 유성군 안산동	X:324,210.0 Y:27,233.5	복운보화강암 27.3~29.0m 54.3~57.4m 68.2~72.8m 대비(%)	60.7 79 31.15	0.7 0.6	6.62 6.78	5.92 6.18	10.25 12.78	8.5 10.49	4.61×10 ⁻³ 5.77×10 ⁻³	양수시
					- - -	0.86 2.35	6.62 6.78	5.76 4.43	- - -	4.06 5.01 23.40	
KYC-11	영천시 괴연동 160-4	128°27'59" 35°53'19"	채악산 빙암층 40.2~44.3m 59.0~65.5m	40 40 -	2.52 1.80	54.82 13.0	52.3 11.2	0.765 3.571 366.8	1.420 3.052 114.93	- - -	양수시
KJD-1	진도군 군내면 둔천리 32-15	X:117.450 Y:135.155	역질옹회암	11 30 172.7	15.66 15.33	22.55 32.88	6.89 17.55	1.60 1.71 7.0	0.5 0.57 14.5	9.12×10 ⁻⁵ 9.93×10 ⁻⁵ 8.9	양수시
KYC-3	영천군 화산면 대안2리	128°49'06" 36°01'57"	반야월층(신라층) 26.8~27.1m 72.5~73.8m 91.5~92.1m	40 40 -	13.48 9.5	88.01 64.79	74.53 54.29	0.537 0.737 27.14	0.214 0.259 6.95	1.28×10 ⁻⁴ 3.67×10 ⁻⁴ 65.12	양수시
KCG-1	칠곡군 지천면 심천리 50	X:275.880 Y:156.058	하산동층(칠곡층) 낙동층(군)	30 30 대비(%)	0 0	24.58 43.68	24.58 43.68	1.22 0.69 -43.4	0.7 0.14 -79.58	1.01×10 ⁻³ 1.25×10 ⁻⁴ -86.48	양수시 불량해짐
				KCG-2 대비(%)	- 0.55 0.3	1.11 0.97	0.56 0.67	- -	0.74 0.16 -78.4	1.14×10 ⁻³ 1.13×10 ⁻³ -0.9	양수시, 관측정
			KCG-1	- - -	0.26 20.34	25.48 43.68	24.32 23.34	- -	0.73 0.14 -8.1	- - -	회복시
			KCG-2	- - -	0.21 0.97	- 0.76	- -	- -	3.9 -	- -	회복시
KCG-2	칠곡군 지천면 심천리 50	X:275.870 Y:156.100	하산동층(칠곡층) 8.3~8.5m 40.5~41.8m 73.3~73.6m 대비(%)	28 29.2 4.3	0.9 1.75	61.11 56.88	60.21 55.13	0.46 0.53	0.15 0.24	1.89×10 ⁻⁴ 4.01×10 ⁻⁴	양수시
				대비(%)	- - -	0.89 32.28	61.11 56.88	60.22 24.60	- -	0.08 0.15 87.5	

증가하였고, 퇴적암 지역에서는 비양수량이 7%~366.8%, 투수량계수가 15.1%~114.9% 증가하여 암종에 따라 다양하게 나타나는 것을 알 수 있다.

변성암인 편마암은 1공의 자료밖에 없고 그나마 사전 대수성시험 자료의 해석에 문제가 있어 투수량계수의 대비는 신빙성이 없으므로 비양수량을 보면 164.4% 증가한 것으로 나타나고 있다.

이 자료는 한국의 퇴적암 지역에서 인공수압파쇄에 의한 지하수산출량 증대효과는 상대적으로 낮다는 것을 시사하는 것이다.

6.2. 영향범위

인공수압파쇄시험의 영향권 내지는 영향범위를 정성적으로 평가하는 방법은 시험정 인근에 관측정이 있어 인공수압파쇄시험 중 또는 시험 전·후의 대수성 시험시에 측정된 수위강하 자료로부터 우물장의 지하수흐름 양상의

변화를 평가하는 것이다. 총 12개소의 시험공 중 4개소에서 영향범위를 추정할 수 있는 자료가 수집되었으며 Table 6에 표시하였다.

6.2.1. G-1공

G-1공의 경우는 인공수압파쇄시험 시 물을 25 kg/cm²의 압력으로 주입함으로서 상류구배구간으로 82.7 m 상거한 지점에 위치한 관측정의 지하수위가 약 0.56 m 정도 상승한 것이다. 관측정과의 사이는 치매요양원 부지로서 나대지 상태이나 수동리 마을의 하천형상으로 보아 구하상을 매립한 지역으로 추정된다.

인공수압파쇄를 2002년 1월 31일 오후 3시 23분부터 시작하였는데 관측정에서는 57분 후부터 지하수위가 서서히 상승하다가 주입개시 1시간 13분 후에는 최대로 0.56 m 정도까지 상승한 후 서서히 하강하기 시작하였다. 참고로 시험정에서는 주입개시 후 4분 후에 최대 25 kg/cm²까지

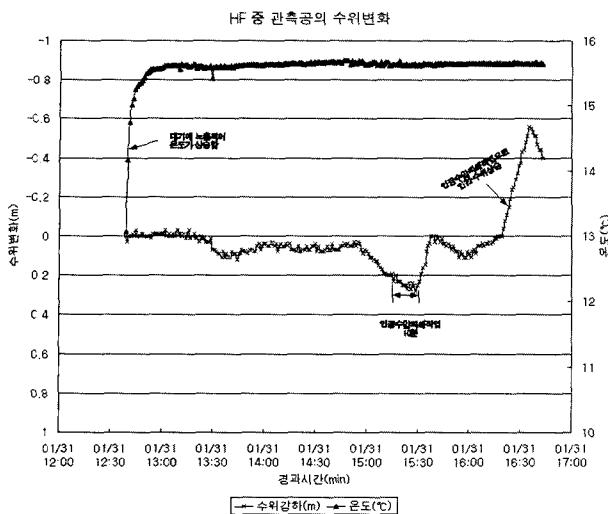


Fig. 7. Time-groundwater level and temperature during hydrofracturing at G-1 well.

수압이 상승되었다가 서서히 하강되었으며 14분 동안 주입하였다.

6.2.2. GW-1공

시험정을 중심으로 동·남·서 방향으로 약 5m 상거하여 3개의 관측정이 위치하는 시험정 1조로 인공수압파쇄시험 전·후의 대수성 시험시 지하수위 강하상태가 Fig. 8에 도시되어 있다.

Fig. 8에서 보면 $77 \text{ m}^3/\text{d}^{-1}$ 시 채수율로 사전대수성 시험시 시험정 지하수위가 35.4m까지 하강함에 따라 동쪽의 관측정 GH-1은 15.7m, 남쪽의 관측정 GH-2는 4.5m 그리고 서쪽의 관측정 GH-3은 5.7m 하강하여 동쪽의 GH-1 관측정의 지하수위가 2~3배 낮아져서 심한 불균형 상태를 보였다. 반면, $66.2 \text{ m}^3/\text{d}^{-1}$ 의 채수율로 사후 대수성 시험시에는 시험정의 지하수위가 13.1m까지 하강함에 따라 GH-1은 9.3m, GH-2는 6.2m 그리고 GH-3은 7.7m로 하강되어 사전 대수성시험시와 비교하여 GH-1은 6.4m

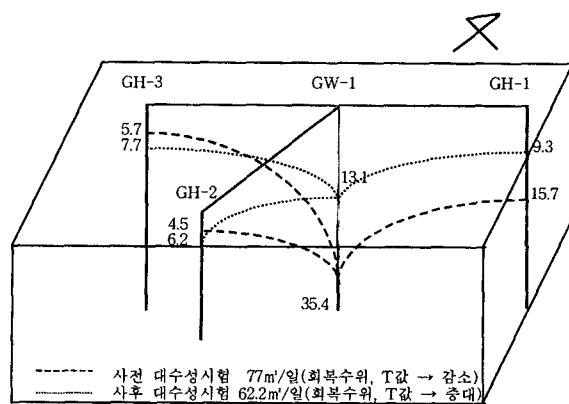


Fig. 8. Groundwater level patterns before and after hydrofracturing at GW-1 well field.

가 덜 낮아진 반면 GH-2 및 GH-3에서는 각각 1.7m와 2.0m가 더 낮아졌다.

이는 53 kg/cm^2 압력으로 인공수압파쇄시험에 의해 이 우물장의 반경 5.4m까지는 기존 균열대를 고르게 확장시켜 지하수가 각 방향에서 균형적으로 유입된 데에 기인하는 것으로 해석된다.

6.2.3. KCG-1 및 KCG-2 공

시험정간의 공간의 거리는 47.9m로 표고차가 대략 3.3m 정도인 완만한 구릉지의 평탄한 비탈면에 촉정되었다. 당초 KCG-1정은 월류 상태였고, 상대적으로 높은 위치인 KCG-2는 지하 0.45m에 지하수위가 있었다. KCG-1 우물은 인공수압파쇄 후에도 KCG-1의 수두는 여전히 월류 상태였으나, KCG-2 우물에서 인공수압파쇄 후에 지하수위는 KCG-1이 지하 2.1m, KCG-2가 지하 2.8m로써 낮게 형성되었다. 그리고 KCG-2에서 인공수압파쇄시 KCG-1과 KCG-2에서 공히 암회색 단층점토(?)가 섞인 물이 토출되었다. 이를 모식도로 도시하면 Fig. 9와 같다.

Fig. 9를 보면 KCG-2 우물을 기준으로 지하 32m~48m 사이에 분포하고 있는 피압층에 KCG-2공에서

Table 6. Impact Distances by Hydrofracturing

공번	시험정 수위강하(m)			관측정 1(m)			관측정 2(m)			관측정 3(m)			비고
	거리	사전	사후	거리	사전	사후	거리	사전	사후	거리	사전	사후	
G-1	0	가압	-	82.7	0	+0.5	-	-	-	-	-	-	HF시 관측정수위상승
GW-1	0	35.4	13.1	4.5	15.7	9.3	5	4.5	6.2	5.4	5.7	7.7	HF로 균열 고르게 발달
KCG-1	0	9.8	4.1	5.52	7.36	3.97	12.73	2.77	3.56	-	-	-	HF로 균열 고르게 발달
KY-A-1	0	월류	2.1	47.9	0.45	2.8	-	-	-	-	-	-	HF로 단층점토 이동, 피압층 파쇄

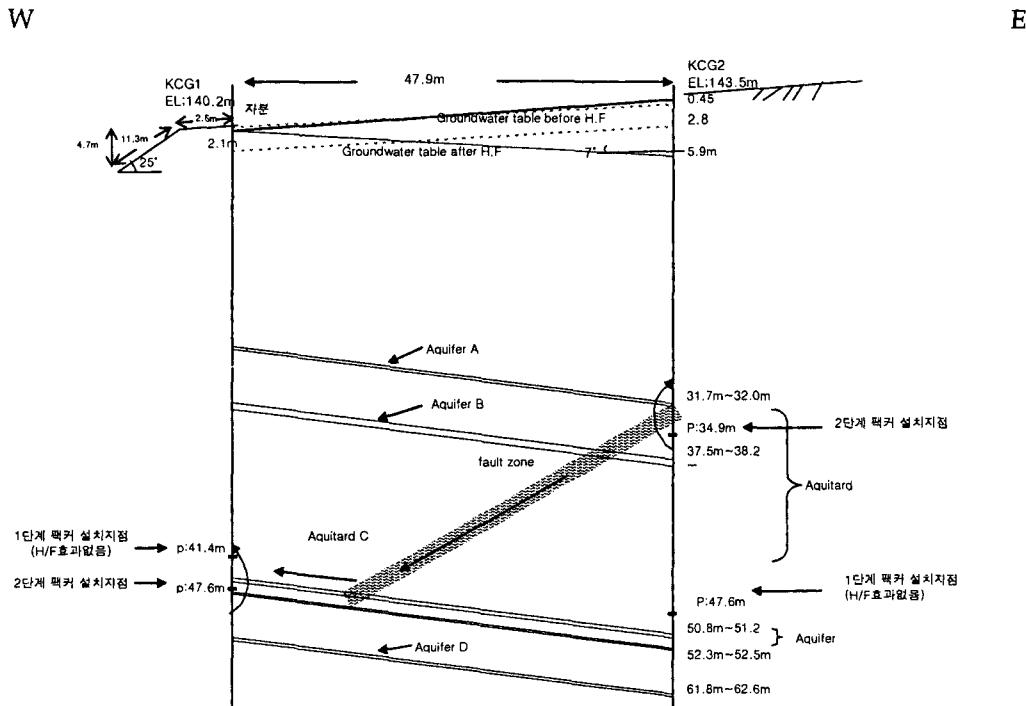


Fig. 9. Groundwater variation before and after hydrofracturing at KCG-1 & KCG-2 well field.

KCG-1공 쪽으로 저각도로 경사진 소단층이 발달하여, 단층에 협재된 암회색 단층점토가 KCG-2 공에서 실시한 49 kg/cm^2 압력의 인공수압파쇄로 밀려 KCG-1 공으로 토출되었으므로 이 우물장에서 영향범위는 적어도 47.9 m 이상이라고 상정된다.

참고로 KCG-1 공에서는 팩커심도 41.4 m의 1단계 인공수압파쇄시험에서는 아무런 감압현상이 없었지만 팩커심도 47.6 m인 2단계 시험에서는 감압현상과 함께 적갈색 흙탕물이 토출되었고, KCG-2공에서 인공수압파쇄 이후 암회색 물이 KCG-1공에서 배출되었으므로 대체적으로 파입층의 층후는 최소 6.2 m 이상으로 평가된다.

인공수압파쇄시험 이후에 지하수위가 낮아진 것은 파입층 하부 대수층의 지하수위의 수두까지 낮아진 것으로 해석되며 당초 자유면대수층의 수두보다 약 2.4 m 정도 낮아진 것으로 추정된다.

6.2.4. KYA-1공

용결웅회암에 지하수 기초조사용으로 착정된 우물로 Fig. 10에 도시된 바와 같이 동쪽으로 5.52 m, 서쪽으로 12.73 m 거리에 관측정이 설치되어 있다.

여기서도 19 kg/cm^2 의 인공수압파쇄 시험 전의 채수율 $40 \text{ m}^3/\text{d}$ 로 양수시 강하된 지하수위 양상에 비하여 같은 채수율로 시험후에 양수시 지하수위의 강하된 양상은 판

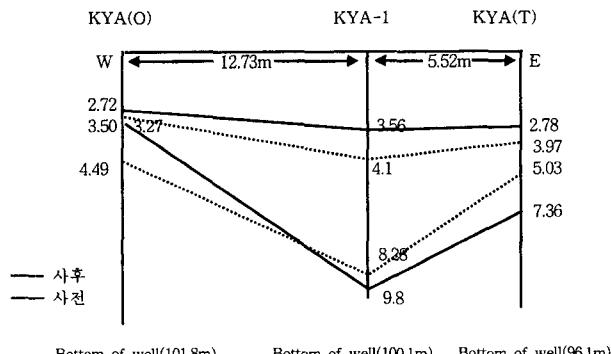


Fig. 10. Groundwater level patterns before and after hydrofracturing at KYA-1 well field.

이하게 달라져 있다.

즉, 동쪽의 KYA(T) 관측정에서 지하수위 강하 양상이 상당히 개선된 것으로 나타나고 있어 적어도 반경 5.52 m 까지는 확실하게 영향을 준 것으로 보이며, 서쪽으로 12.73 m 떨어진 관측정 KYA(O)에서 지하수위 강하가 당초보다 많이 발생한 것으로 보아 지하수의 유입이 고르게 발생하고 있음을 알 수 있다.

6.3. 부정적 효과

12개소의 시험정 중에서 KCG-1공 1개 우물은 인공수압파쇄로 부정적인 효과를 나타내고 있다.

Table 7. Negative Effect from Hydrofracturing at KCG-1 & KCG-2 Well Field

공번	비양수량($m^3 d^{-1}$)			투수량계수($m^3 d^{-1}$)			비고
	사전	사후	감소율(%)	사전	사후	감소율(%)	
KCG-1	1.22	0.69	43.4	0.7	0.14	79.6	

KCG-1 우물은 인공수압파쇄 전·후 공히 월류 상태였으나, 파쇄시험 후에 수두가 뚜렷하게 낮아진 것을 감지할 수 있었다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 심도 41.4 m에서 1단계 시험 시는 아무런 변화가 없었으나, 2단계로 심도 47.6 m에 팩커를 설치하고 시험 시 적갈색 흙탕물이 토출되었다. 이는 상부에 있는 최소 두께 6.2 m 이상인 피압층 하단에 팩커가 장착되어 그 하부에 협재된 박층의 대수층이 층리를 포함한 기존의 균열대가 확장되어 나타난 현상이며, 그 박층의 대수층의 피압수두까지 지하수위가 강하되는 결과를 초래한 것이다. 그러나 이 2단계 인공수압파쇄시험이 KCG-1에 현저하게 부정적인 영향을 주지는 않았을 것으로 판단된다.

부정적인 효과는 2003년 10월 31일 같은 날 밤에 KCG-2공에서 실시한 인공수압파쇄시험에서 초래되었다. 이때 KCG-2공에서 다량의 암회색 단층점토가 토출되었고, 익일 실시한 KCG-1 공의 사후 대수성 시험시 토출된 지하수의 물빛도 당초의 적갈색에서 짙은 암회색 내지 암회색으로 변한 것으로 미루어 보아 KCG-2의 인공수압파쇄시 양 우물 사이에 발달된 단층에 협재된 점토가 밀려 KCG-1의 균열대를 폐색시켜 나타난 현상으로 해석된다.

KCG-1공 자체의 인공수압파쇄로 피압수두는 다소 감소한 상태이지만, 산출량에는 KCG-2공의 인공수압파쇄가 크게 영향을 미친 것으로 추정된다. Table 7에서 알 수 있는 바와 같이 KCG-1공의 사전·사후 대수성시험 결과 비양수량은 $1.22 m^3 d^{-1}$ 에서 0.69 로 43.4%나 감소하였고, 투수량계수도 $0.7 m^3 d^{-1}$ 에서 $0.14 m^3 d^{-1}$ 로 79.6%가 감소하였다. 이러한 규모의 산출량 감소는 그에 상응할 정도의 대수층의 변화가 전제되어야 하는데 단층점토의 폐색만이 그 상황을 설명해 줄 수 있다.

이런 현상은 장기간에 걸친 써징(Surging) 등의 우물청소로 이동된 단층점토를 셋어냄과 동시에 상부의 자유면 대수층에서 파쇄된 균열틈을 통하여 피압대수층 하부에 물이 충전되어 자유면 대수층의 상태에 도달하게 되면, 이 우물의 산출량은 상당히 개선될 것으로 판단된다.

이렇게 보면 장기적인 관점에서는 단층점토의 이동에 의한 기준균열의 폐색도 부정적 효과라고 볼 수는 없다는 견해이다. 다만, 능력 있는 전문가에 의한 적절한 정호관리가 관건이 될 것이다.

7. 결 론

한국에서 인공수압파쇄기법에 의한 지하수 산출량 증대는 가능하며 긍정적이다. 다만, 지질 및 지체구조에 따라서 장비 및 파쇄기법의 선택과 적용에서 숙련된 기술이 필요할 뿐이다.

이에 따라 산출량에 증대정도도 상당한 범위까지는 조절이 가능할 것으로 추정된다. 다만, 이 기술은 우물과 주변의 대수층의 물리적 기능을 향상시킬 수 있을 뿐이며, 장기간에 걸친 물의 공급능력을 담보하는 것은 아니라는 점을 분명히 인식하여야 할 것이다.

대부분의 저산출 우물은 우물이나 인근 대수층의 물리적 기능의 저하에 의해 산출량이 적어지기 보다는 우물로 물을 지속적으로 공급해 주는 풍부한 급수원(source)이 없기 때문에 산출량이 갑자기 감소되는 경우가 많이 발생하고 있는 것이다.

실제로 신규 우물의 개발시 산출량이 높게 평가된 우물이 가동 후 얼마 지나지 않아서 산출량이 저감되어 곤란을 겪는 것은 우물의 기능이 낮아져서라기 보다는 대수층에 저류된 물이 과잉채수로 부족하게 되어 발생되는 경우가 더 흔히 발생하고 있기 때문이며, 이 때는 적정 채수량을 초과하지 않도록 우물을 관리하는 것이 중요하며 과잉채수는 금기시해야 될 것이다.

따라서 무엇보다 중요한 것은 신규 우물의 개발시 지하수 저류량이 풍부한 곳에 근접하여 개발토록 유의하여야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발 사업인 수자원의 지속적 확보기술 개발단의 연구비 지원(과제번호 3-4-1)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 지하수조사연보, 건설교통부/한국수자원공사(2001).
2. 간이상수도 운영·관리 개선대책, 환경부 상하수도국(2002.
3) 미공개자료.
3. 지하수조사연보, 건설교통부/한국수자원공사(2000).

4. 한정상 등, 인공수압파쇄 실증시험 및 지하수활용 지방상수 도 관리개선방안 연구, 과학기술부, 미발간자료.
5. 한정상 등, 인공수압파쇄기법에 의한 지하수 양수량 증대, 한국지하수토양환경학회, 7(2), (2002).
6. ASTM, D4645-87 (Reapproved 1997) Standard Test Method of Determination of the In-Situ Stress in Rock Using the Hydraulic Fracturing Method1 (1987).
7. 최성웅 등, 유류비축기지 설계를 위한 대심도 경사공에서의 수압파쇄 초기응력해석, 한국지반공학회 논문집, 15(4), (1999).
8. 대림산업(주), 중앙선(덕소-양수간) 복선전철 건설공사 지반 조사보고서, 팔당터널 TB-11(5건) 및 팔당터널 TB-16(5건) (2000).
9. 대림산업(주), 청주-상주간 고속도로 건설공사 제3공구 토질 조사보고서, 회복터널(4건) 및 건천터널(4건) (2000).
10. 대우건설(주), 성남-장호원간 도로개설(2공구) 건설공사 지반조사보고서(5건) (2001).
11. 삼성물산, 산외-상북간 제3공구(능동터널) 국도확장공사 토질조사보고서, TH-4(3건), TH-7(4건) (2000).
12. (주)대우, 산외-상북간 제3공구(능동터널) 국도확장공사 토질조사보고서(5건) (2000).
13. (주)대우, 영동선 동백산-도계산 철도이설 건설공사 지반조사보고서(8건) (1990).
14. (주)대우, 유신설계공단, 경춘선 복선전철 7공구 건설공사 지반보고서, 백양 3터널(4건) 및 강촌 1터널(3건) 입·출구(1999).
15. 한국도로공사, 서울외곽순환고속도로(벽제-퇴계원구간) 건설공사 실시설계 토질조사보고서, 2공구(장흥-호원) : 사파산 터널구간(7건) (1998).
16. 한국도로공사, 전수-함양(의산-장수)간 고속도로(제10공구) 건설공사 지반조사보고서(5건) (2000).
17. 한국도로공사, 전수-함양간 고속도로(제10공구) 건설공사 (천천-장계) 지반조사보고서(2건) (2000).
18. 한국도로공사, 전주-함양(의산-장수)간 고속도로(제3공구) 건설공사 지반조사보고서(2건) (2000).
19. 한국수자원공사, 한탄강댐 본댐 및 부대시설공사 지질조사 보고서(7건) (2002).
20. 현대건설(주), 청주-상주간 고속도로 건설공사 제3공구 토질 조사보고서, TB-10(4건) 및 TB-20(4건) (2000).
21. 현대건설(주), 삼보기술단, 신북-양구(수인리구간) 국도개량 건설공사 T/K 설계용역 토질조사보고서, 수인터널 입·출구(10건), 웅진터널 입·출구(5건) (1999).
22. 현대건설, 현대엔지니어링(주), 지하철 9-12공구 건설공사 지반지질조사보고서(9건) (2001).
23. 현대산업개발(주), (주)전화엔지니어링, 양구읍(웅진리 구간) 지내 국도개량 건설공사 토질조사보고서, 웅진 3(3건), 4터널(7건) 구간(2000).
24. 현대산업개발(주), 중앙선(덕소-양수간) 복선전철 건설공사 지반조사보고서, 팔당터널(4건) (2000).
25. Heim, Underground Excavation in Rocks, Institute of Mining and Metallurgy, London, pp. 97, (1980).
26. Heok, E. and Brown, E., Underground Excavations in Rocks, Institute of mining and Metallurgy, London. pp. 98-99 (1980).
27. 김수정, 한국의 지질에 적합한 설계정수 도출에 관한 연구, 박사학위 논문 (2002).
28. Driscoll, P.G., Groundwater and Wells (2nd Ed.) (1986).
29. 한정상, 지하수학 개론, 박영사 (1982).