

암종별 산출량 변화 평가를 통한 수압파쇄기법의 타당성 연구

김진훈 · 김형수* · 석희준

한국수자원공사 수자원연구원

A Study on Feasibility of Hydraulic Fracturing with Evaluation of Yield Variance by Rock Types

Jin-Hoon Kim · Hyung-Soo Kim* · Heejun Suk

Korea Water Resources Corporation, Korea Institute of Water and Environment

ABSTRACT

Hydraulic fracturing is guaranteed to create or enlarge fracture, so the hydraulically created fracture acts as a conduit in the rock, allowing the groundwater to flow more freely through the fracture system. In a recent study, it showed that 12 wells where hydraulic fracturing was performed increased well production. However, it was estimated not to present representation by rock type due to not enough wells. Therefore, this study was performed to clarify the application of hydraulic fracturing at 19 water wells. Rocks were divided into igneous rocks (9 sites), metamorphic rocks (4 sites), and sedimentary rocks (6 sites) to evaluate representative features. As a result, the average of well yield increases 93.4% in the igneous rocks, 103% in the metamorphic rocks, and 42.2% in the sedimentary rocks. Accordingly, hydraulic fracturing presented in this study provides an effective method for increasing well production

Key word : Hydraulic fracturing, Well production increase

요 약 문

수압파쇄 기법은 암반 내에 파쇄를 수압을 이용하여 생성하거나 확장시키는 기술로서, 이렇게 생성된 파쇄대는 지반 안에서의 흐름의 통로 역할을 하며, 지하수가 자유롭게 흐르도록 한다. 본 연구에서는 최근에 수압파쇄 기법이 수행된 12개 관정 결과를 바탕으로 암종별 특성을 분명하게 파악하기 위하여 7개의 관정에서 추가로 수압파쇄를 실시하였다. 총 19개소에 대해 화성암(9개소), 변성암(4개소), 퇴적암(6개소)으로 대분하여 암종에 따른 수압파쇄의 가능성을 평가하였으며, 시험결과 화성암은 평균 93.4%, 변성암은 평균 103%, 퇴적암은 42.2%의 산출량 증가를 보였다. 본 연구에서 수행된 수압파쇄의 적용은 암종별로 차이를 보이지만, 전반적으로 관정의 산출량을 증대시키는 효과적인 방법임을 확인하였다.

주제어 : 수압파쇄, 산출량 증대

1. 서 론

지하수조사연보에 의하면 2002년 한 해 동안 전국 119만 공에서 약 34.7억 m³의 지하수를 이용했으며, 2001년 (111만여공, 약 32.1억 m³)에 비해 지하수 이용시설은 약

8만여공, 이용량은 약 2억6천만 m³이 증가한 것으로 나타났다. 한편, 2002년에만 발생된 미처리 폐공시설과 처리된 폐공시설을 합치면 41,407개에 달한다. 폐공 발생을 원인별로 분석해보면 전체 41,407개중 12,423개(30%)가 산출량 부족으로 인하여 폐공처리 되었다(건설교통부,

*Corresponding author : hskim@kowaco.or.kr

원고접수일 : 2005. 1. 18 게재승인일 : 2005. 5. 22

질의 및 토의 : 2006. 2. 28 까지

2003). 특히, 국내 단일 암반 대수층의 경우, 지층내 파쇄대의 발달 미흡, 불균질성 및 이방성 등으로 수리적인 연결성이 저조하여 인접한 위치에서도 우물의 산출성에 큰 차이가 나타나는 사례가 빈번하다(대한광산지질학회, 1992; 서울특별시, 1996). 수량부족으로 인해 관정을 폐공 처리하고 새로운 관정을 개발하는 데에는 상당한 시간과 경비가 소요되고, 폐공을 방지한다면 지하수 오염을 초래할 수 있다. 따라서 지하수에 대한 지속적인 이용과 관리를 한다면 폐공 처리되는 관정을 줄여 시간과 비용을 줄일 수 있다(Koenig, 1960).

암반 대수층에 설치된 관정의 산출성을 증대시키는 방법으로 수압파쇄, 발파, 진동폭과 처리, 압력산 처리, surging 등이 있다(Baski, 1987). 수압파쇄, 발파, 진동 폭 파처리하는 암반내의 파쇄대를 증대시켜 산출량을 증가시키는 방법이고, 압력산 처리법은 관정내의 생물학적 기작에 의한 막힘현상을 제거하여 관정이 원상태의 산출량을 가지도록 한다. surging은 관정내 이물질에 의한 막힘현상을 제거하여 산출량을 증가시킨다. 이 중에서도 수압파쇄기법은 밀착된 파쇄균열을 효율적이고 비교적 안전하게 이완·개구시키는 방법으로 1940년대부터 유정에 이용되어 왔다(Clark, 1949). 지난 수십 년간 미국의 유정들은 유류나 가스의 산출량이 시간이 지날수록 점차 감소하여 추출비용의 증가로 난관에 봉착하게 됨으로서 산출량을 증대시킬 목적으로 수압파쇄기법을 개발하였다. 1960년에는 Koenig가 처음으로 수압파쇄기법을 지하수용 우물에 적용하여 기초적인 우물개량과 재개량이 포함된 우물활성에 관한 보고서를 제출하였다(Koenig, 1960).

이후 많은 학자들이 유정에만 사용되었던 인공수압파쇄기법을 지하수용 우물에 적용하였다. 하지만 각 지하수 관정의 산출량 증가 비율은 매우 상이하였다. 그 원인으로 인공수압파쇄기법을 적용한 암종별로 서로 다른 산출량을 보인다는 것을 밝혀내고 서로 다른 암종별로 각각 수압파쇄기법을 적용하였다(Macaulay, 1987; Gale, 1982). 1980년 호주수자원위원회(Australian Water Resources Council)가 암종이 서로 다른 3개 우물에 대해 수압파쇄 시험을 실시하였다. No.1 관정은 섬록암내에 설치되었고 시험전의 비양수량은 0.432 m³/d이었고 수압파쇄후의 비양수량은 0.777 m³/d로 1.8배가 증가하였다. No.2 관정은 석영맥이 곳곳에 관입되어 있는 풍화된 편암과 신선 견고한 편암으로 이루어진 곳에 설치되었으며 비양수량은 0.2 m³/d에서 1.2 m³/d로 약 6배 증가하였다. No.3 관정은 천매암과 규암내에 설치되었으며 비양수량은 3.8 m³/d에서 3.6 m³/d로 감소하였다(Williamson and Wooley, 1980).

국내에서는 백건하 외(2003), 한정상 외(2002)의 연구에서 암종별 산출량을 비교하였다. 이 연구에서는 총 12개소에서 인공수압파쇄를 실시한 결과, 평균적으로 화강암류 지역에서 증대효과가 퇴적암류 지역보다 월등한 것으로 나타났다.

한반도는 국토의 반 이상이 화강암과 화강편마암으로 되어 있고 변성퇴적암은 주로 한반도 중부에 분포한다(정창희, 1986). 따라서 한반도에서 수압파쇄기법을 적용하기 위해서는 암석의 종류에 따라 시험을 수행하여 수압파쇄의 타당성을 검토할 필요가 있다. 또한 수압파쇄 기법의 체계적 정량화를 위해서는 암종별 수압파쇄의 효과를 평가하는 것이 선행되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 지역적 특성에 따른 변화를 배제하였다.

본 연구에서는 대수층의 수리특성을 고려하여 국내에 분포되어 있는 암석을 화성암, 변성암, 퇴적암으로 대분하고 이들 암석내에 설치된 저산출 관정에 대한 현황조사를 실시한 후 본 연구에 부합하는 각 암종별 대표관정을 선정하였다. 각 암종별로 화강암 9곳, 변성암 4곳, 퇴적암 6곳을 선정하여 수압파쇄를 실시하고 인공수압파쇄의 효과, 문제점, 국내에 적용시 최적 수행방법 등에 대해 중점적으로 분석하였다.

2. 기본 원리

수압파쇄기법의 성공여부는 굴착우물의 공벽면과 주변 암체내에 분포·발달된 파쇄대가 어떤 형태로 교차하는가에 따라 즉, 주변암체 균열의 크기, 개수, 연결 상태에 따라 좌우된다. 파쇄암체 내에서 지하수 유동이론인 입방체법칙(cubic law)에 따르면 파쇄틈(aperture)이 증가하면 유량도 증가한다. 파쇄의 간격이 확장될 때 파쇄를 통해 유동되는 지하수량은 간격 확장율의 3승으로 비례한다(Waltz, 1988). 수압파쇄기법은 상재하중으로 인해 지압을 받고 있는 암반의 한계인장응력보다 큰 주입압으로 암반 관정에 고압수를 주입하여 암반관정 벽면에 새로운 파쇄를 만들어 내는 것이다. 소규모 파쇄가 이미 존재하고 있는 암체내에서 이들 파쇄를 확장시키는데 필요한 주입 압력은 통상 7~28 kg/cm²(100~400 Psi)이면 충분하고 신규 파쇄를 만들거나 기존 파쇄를 확장시키는데 소요되는 압력은 길이 1 m 당 0.23 kg/cm²정도이다(Hubbert, 1972). 주입압력의 변화 형태는 2가지 유형이 있다(Fig. 1). 초기에 발생한 파괴압에 의해 기존 파쇄대가 열리게 되는 유형과 특이한 파괴압을 나타내지는 않으나 기존 파쇄대를 열리게 하는데 필요한 압력이 주입압과 같거나 다소 적은

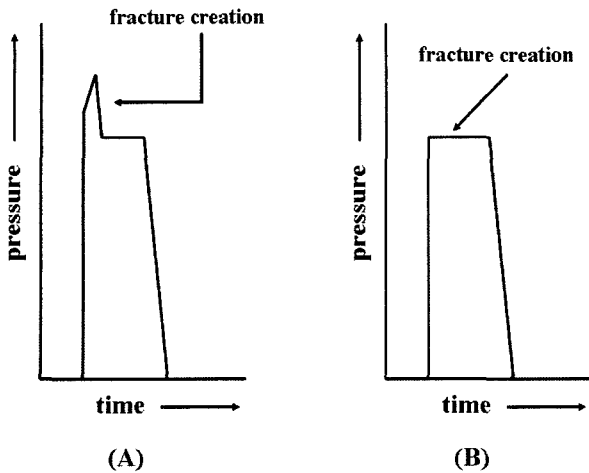


Fig. 1. Typical stress test, pump-in/shut-down.

압력 유형이 있다(ASTM, 1997).

결정질 화성암류나 변성암류들은 수압파쇄가 가장 잘 되는 암종들이다. 또한 저투수성 암체내에 수압파쇄기법을 적용했을 때 형성된 파쇄대가 장기간 유지될 수 있는 암체들에 대해서는 수압파쇄기법을 적용하는데 별무리가 없다. 따라서 퇴적암인 석회암, 사암 또는 연질의 점판암 지대에 설치한 우물에서도 수압파쇄 공법으로 산출량 증대 효과를 얻을 수 있다(Swanson, 1986).

일반적으로 유효공극율이 큰 단층대는 상당량의 암반 지하수를 포함하고 있어 암반지하수 개발의 최적 지질구조일 뿐만 아니라, 연속적인 파쇄들의 집합체이기 때문에 지하수의 주 유동로 역할을 한다. 그러나 단층지대에 설치한 우물에 수압파쇄 공법을 적용할 때는 고압수의 주입에 따른 두 가지 형태의 문제가 발생할 수 있다. 첫째, 단층구간에는 파쇄가 많이 존재하기 때문에 수압파쇄 작업시 고압수를 주입하면 단층대가 쉽게 교란, 붕괴되어 팩커(packer)를 위시한 주입장비가 매몰될 가능성이 있다. 둘째, 단층대의 연약화 현상을 들 수 있다. 대다수의 단층대를 구성하고 있는 물질은 이미 심한 물리, 화학적인 풍화를 받아 단층점토와 같이 거의 토양화 되어있다. 따라서 이들 토립자들 만으로는 단층대를 그대로 유지하기에는 연약하다. 이와 같은 지질조건에서 일단 파쇄대를 확장시키면 확장된 파쇄는 개구 상태를 유지할 수 없다. 화학적 풍화암은 수리전도도가 매우 낮으나, 공극율이 크기 때문에 결정질암 파쇄대에 저류되어 있는 지하수량 보다 훨씬 많은 양의 지하수를 저류하고 있다. 따라서 공극율이 높은 풍화대 구간에 적절한 파쇄대를 형성하여 투수성을 향상시키고 지하수 유로를 만들 수 있다면 높은 공극

율은 해당 우물에 유용한 유효 공극으로 될 것이다.

수압파쇄기법 적용시 필요한 장비중 중요한 부분은 팩커이다. 팩커는 공내 필요한 구간에만 필요압을 공급하기 위해서 사용하는 부품으로 개념적으로 무게가 무거운 일종의 마개이다. 팩커는 종류별로는 확장가능 팩커(inflatable packer)와 인장팩커(tension packer) 두 종류가 있고 설치 방법에 따라 2중 팩커를 이용한 방법과 단일 팩커를 이용한 방법이 있다. 단일 팩커는 설치한 지점 하부 전 구간을 주입대상으로 하고 2개의 팩커를 상·하로 설치한 2중 팩커는 두 개의 팩커를 설치한 사이 구간, 즉 구속구간만 주입대상으로 한다. 2중팩커는 대수성시험에 널리 사용하는데 비해 단일 팩커는 우물개선을 위한 파쇄 작업에 가장 널리 이용한다. 2중 팩커를 이용한 수압파쇄 작업(상향식)이 하향식으로 실시하는 단일 팩커법에 비해 성공률이 높지만 90% 이상의 인공수압파쇄 작업은 비용이 적게 소요되고, 공내에서 물리는 현상이 적은 단일 팩커법을 적용하는데 이 방법을 적용하더라도 충분한 수량을 얻을 수 있다. 따라서 이 연구에서는 2중 팩커를 이용한 방법대신 단일팩커를 사용하여 우물개선을 위한 파쇄 작업을 실시하였다. 팩커확장에 소요되는 최종압은 정수압, 팩커 신축압, 그리고 팩커 장착압을 더한 값으로 결정된다. 통상 400~500 kg/cm²의 압력을 주입하여 팩커를 확장시킨다. 팩커를 확장시키기 위해서는 확장압력이 175~182 bar 정도되는 자동차 세차용 펌프와 같은 고압, 저용량 펌프를 사용해도 된다. 겨울철에는 물과 부동액을 혼합해서 사용하는 것이 좋은 방법이며, 사용액은 비부식성이어야 한다. 가스와 액체를 확장 팩커의 확장재로 사용하는 대다수의 경우, 단일 확장용 라인만으로도 충분하지만 심도가 깊어 정수압이 큰 경우에 물을 확장재로 사용하면 팩커를 수축시키는 시간이 길어지기 때문에 이 경우에는 2개 라인을 이용해서 1개 라인은 확장시 사용하고 다른 라인은 수축시 사용한다(Swanson, 1986).

3. 연구 지역 및 방법

3.1. 연구 지역

수압파쇄 시험은 13개 지역 총 19개 관정에서 실시되었으며, 암종별 수압파쇄 적용시의 주입특성 및 시험효과를 검토할 수 있도록 최대한 다양한 암종의 지역에 굴착된 우물을 대상으로 수압파쇄를 적용하고자 하였으나 시험 대상 우물의 선정이 용이하지 않아 화성암류 및 퇴적암류 지역에 편중되어 실시되었다. 암종별 수압파쇄에 의한 관정의 산출량 증대효과를 평가하기 위해 화성암 5개

Table 1. Description of 19 test wells

Test Well	Location	Geological Unit	Pumping rate (m ³ /d)	Remark
G-1	Yusung, Deajeon	Jurassic coarse two-mica granite	108.9	*HF이전
			139.8	HF이후
			+28.4%	변화율
IW-4	Hongchun, Gangwon	Jurassic Deabo Granite	108.5	HF이전
			108.5	HF이후
			0%	변화율
O-9	Pochun, Gyeonggi	Medium-Coarse Granite	30.0	HF이전
			30.8	HF이후
			+2.3%	변화율
O-6	Pochun, Gyeonggi	Medium-Coarse Granite	18.0	HF이전
			20.4	HF이후
			+13.3%	변화율
O-7a	Pochun, Gyeonggi	Medium-Coarse Granite	11.6	HF이전
			28.8	HF이후
			+148.3%	변화율
O-10	Pochun, Gyeonggi	Medium-Coarse Granite	12.5	HF이전
			11.4	HF이후
			-8.8%	변화율
MW-7	Pochun, Gyeonggi	Medium-Coarse Granite	10.7	HF이전
			10.9	HF이후
			+1.9%	변화율
KYS-1	Yusung, Deajeon	Two-mica Granite	30.5	HF이전
			40.0	HF이후
			+31.1%	변화율
KYS-2	Yusung, Deajeon	Two-mica Granite	60.7	HF이전
			79.0	HF이후
			+30.2%	변화율
GW-1	Gyeyang, Inchun	Biotite Gneiss	77.0	HF이전
			62.2	HF이후
			-19.2%	변화율
KPD-1	Hanam, Gyeonggi	Biotite Banded Gniess	28.0	HF이전
			28.0	HF이후
			0%	변화율
KRW-1	Boryeong, Chungnam	Porphyroblastic Gniess	110.0	HF이전
			111.9	HF이후
			+1.3%	변화율
KRW-2	Boryeong, Chungnam	Porphyroblastic Gniess	108.6	HF이전
			110.8	HF이후
			+1.6%	변화율
KYC-11	Yeongcheon, Gyeongbuk	Cheayaksan Porphyrite Layer	40.0	HF이전
			40.0	HF이후
			0%	변화율
KJD-1	Jindo, Jeonnam	Lithic Tuff	11.0	HF이전
			30.0	HF이후
			+172.7%	변화율
KYC-3	Yeongcheon, Gyeongbuk	Banyaul Layer (Shinla Formation)	40.0	HF이전
			40.0	HF이후
			0%	변화율

Table 1. continued

KCG-1	chilgok, Gyeongbuk	Hasandong Layer	30.0	HF이전
		(Kyungsangnu Formation, Nakdong Formation)	30.0	HF이후
			0%	변화율
KCG-2	chilgok, Gyeongbuk	Hasandong Layer	28.0	HF이전
		(Kyungsangnu Formation, Nakdong Formation)	29.2	HF이후
			+4.3%	변화율
KYA-1	Yeongam, Jeonnam	Welded Tuff	40.0	HF이전
			40.0	HF이후
			0%	변화율

* HF: Hydraulic Fracturing

지역 9개소, 퇴적암 5개 지역 6개소, 변성암 3개 지역 4개소의 13개 지역 19개소의 우물에서 인공수압파쇄 시험을 실시하였다. 각 시험 관정에서의 위치, 수문지질단위 지질분포, 대수층 시험시 각 관정에서 사용되었던 양수량을 인공수압파쇄 이전과 이후로 나누어 Table 1에 나타내었다.

3.2. 수압파쇄 실험

현장답사에서는 관정의 위치, 지질분포 등을 조사하였다. 그리고 인접 관정과 구조물과의 상대적인 위치, 대상 관정의 현황조사, 장비 진입 가능성과 작업의 용이성 등을 파악하였다. 그리고 관정의 현황조사에서 케이싱 설치 심도, 관경, 심도, 심도별 관경 및 지하수위를 측정하여 수압파쇄 시험 가능성을 판단하였다. 또한, 관정내 TV검층을 실시하여 수압파쇄 실시 이전의 관정내 파쇄규모, 파쇄대의 분포상태, 주 대수층의 분포구간을 확인하고 팩커 장착지점을 선정하였다. 이후 수압파쇄기법을 통한 관정의 산출량 증감 여부를 판단하기 위해 대수성 시험을 통하여 비양수량, 투수량계수, 그리고 저류계수를 산출하였다. 대수성 시험은 양수용 펌프(PLS-2033HP, LG, Seoul, Korea)와 Hermit2000(In-Situ Inc, Fort Collins, CO)을 이용하여 실시하였다. 각각의 실험관정에서의 양수량은 관

정의 상태에 따라 11~110 m³/d로 달리 실험을 실시하였다(Table 1). 수압파쇄 시험에서 사용된 주입수는 시험 관정에서 양수한 지하수와 인접 관정에서 양수한 지하수를 주입용수로 이용하거나 양수할 지하수가 없는 곳에서는 물차 및 근처 하천수를 염소 소독 후 사용하였다. 팩커를 관정에 삽입하기전 팩커, 확장라인, 그리고 파이프를 연결한 후 팩커를 최대 압력(400~500 kg/cm²)으로 2~3회 반복하여 확장과 수축을 시켜 봉합부위와 성능을 사전 평가하였다. 인공수압파쇄에 사용된 장비들은 Table 2와 같다.

모든 준비가 완료된 후에 공내 TV검층을 통해 검사한 파쇄대의 주 분포대에 팩커를 장착하고 인장팩커의 압력이 400~500 kg/cm²되도록 하였다. 장착이 완료된 후 가압 펌프를 가동시키고 제 1주입구간에 40~50 kg/cm²의 압력으로 1차 가압을 실시하였다. 파쇄대가 개구될 수 있을 정도로 충분한 양의 물이 주입된 다음에는 동일 구간에 대해 2차로 수압파쇄를 실시하였다. 이때는 1차보다 많은 양의 물이 주입될 수 있도록 고용량의 2번째 주입펌프를 사용하여 60~70 kg/cm²로 2차 가압을 실시하였다. 파쇄가 일어난 후 개구된 파쇄대로부터 탁도가 높은 물이 보일 때까지 공내에 주입한 물을 청소하였다. 설치한 팩커를 인양하여 케이싱 상단을 통해 주입수와 인공파쇄대에서 나오는 물을 용출시켰다. 제 1구간에서 실시한 인공

Table 2. Hydraulic fracturing devices

Equipments	Options
High-pressure Injection Pump	140 bar, 350 L/min,
Packer extention pump (Manual hydraulic pressure type)	Maximum 700 bar
Frac-Packer™ (Tension Packer PK-4075)	7.5"OD, 8"-8.75" water well type (700bar) 5.5"OD, 6"-6.75" water well
Hydraulic pressure Hose (High pressure type)	1/4"×10 m
Frac-pipe	SS drill pipe 1.5"×3 m
Hydraulic Pressure Winch	1.3 ton, 1/4" cable
Submergible Pump	2Hp
Borehole TV	Geovision™

수압파쇄 결과에 따라 다른 위치에서 수압파쇄 실시여부를 결정하였다. 이때 인접 우물의 수위변화를 동시에 측정하였다. 인공수압파쇄가 종료된 후 공내 검층을 실시하여 사전 공내검층 결과와 차이를 파악하고 시험 후 대수성 시험을 실시하여 인공수압파쇄 시행 이후의 비양수량, 투수량계수, 그리고 저류계수를 재산정하여 A/B율(A: 수압파쇄 전, B: 수압파쇄 후) 증감여부를 파악하였다.

4. 연구 결과

수압파쇄의 성공여부는 수압파쇄 전·후에 실시되는 양수시험을 통해 결정되어진다. 양수시험을 통해 산정한 비양수량, 투수량계수, 저류계수는 Jacob's method와 Theis's method에 의해서 계산하였다. 양수시험시 각각의 관정의 상태에 따라 10~110 m³/d로 양수시험을 실시하였다. 화성암에서 실시한 수압파쇄 실험의 주입압력의 변화를 살펴보면 Fig. 2와 같다. 1단계로 지하 39 m에 팩커압 400 kg/cm²로 확장팩커를 설치하고 주입을 시작한지 40초만에 수압이 45 kg/cm²까지 상승하다가 40 kg/cm²로 5 kg/cm² 압력강하 현상이 발생하였다. 이 현상은 팩커설치 하부구간에서 암반 파쇄현상이 발생한 것으로 사료된다(Fig. 2). 그 후 6분간 48 kg/cm²으로 압력을 유지시켰지만 압력의 변화가 없어 일시 중단하고 케이싱 상부나 우물 주변으로 윌류나 누수가 없는지를 점검하고 물을 재주입하였다. 재주입 후 처음 30초간 45 kg/cm²까지 급상승하였으나 그 후 서서히 증가하여 1분 30초 후에 48 kg/cm²까지 상승되어 4분 30초간 주입되는 도중에 2 kg/cm² 정도의 압력강하 현상이 있었으나 고압주입으로 발생한 진동의 영향인지 지중에서 암반의 파쇄대가 추가로 확장된 것인지 판단이 곤란한 상태였다. 계속 48 kg/cm²의 주입압을 유지한 채 1분간 주입하다가 변화가 없어서 55 kg/cm²까지 상승시키기 위하여 밸브를 열은 후 약 20초가 경과되었을 때(압력: 52 kg/cm²) 팩커 구간의 암반 파쇄대가 파열되어 케이싱 상단으로 탁수가 윌류하면서 압력이 50 kg/cm²로 하강하였다. 이 상태로 약 4분간 유지하다가 압력의 변화가 없어서 시험을 중단하고 400 kg/cm²의 팩커압으로 지하 27 m지점에 인장팩커를 설치하여 2단계 시험을 준비하였다.

2단계 시험은 약 50분 후에 시작하였다. 처음 20초간의 압력은 45 kg/cm²로 상승된 채 케이싱 상단으로 흐른 탁수가 계속 윌류되어서 약 4분간 지속하다가 상부지층의 교란 및 파쇄로 인한 우물 붕괴의 우려가 있어 시험을 종료하였다. 이상의 결과로부터 2회의 파쇄대 확장이 발

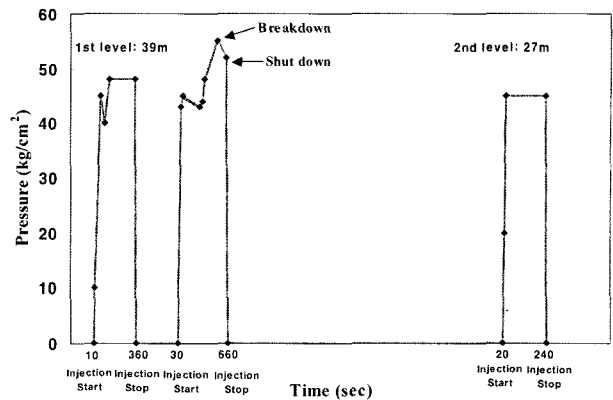


Fig. 2. Change of injection pressure in igneous rocks.

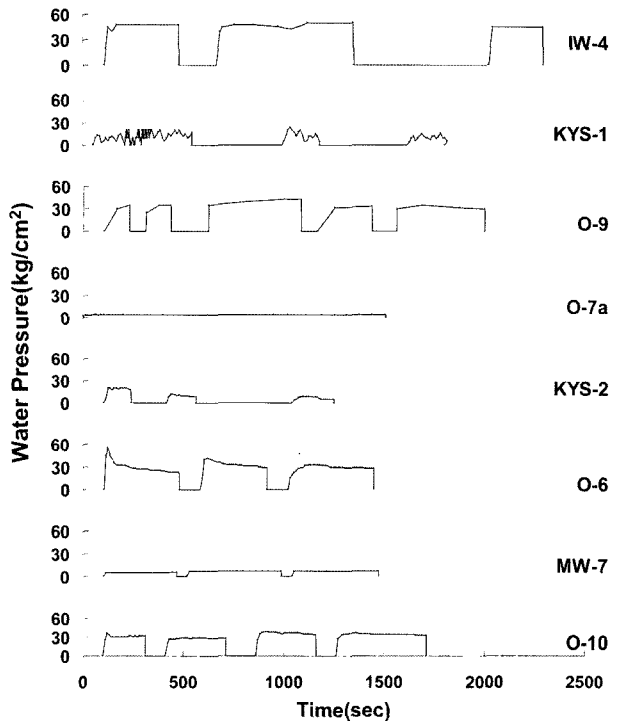


Fig. 3. Change of injection pressure during hydraulic fracturing in igneous rocks.

생된 것으로 판단되었다. 초기에 45 kg/cm²에서 5 kg/cm²의 압력강하 현상을 보인 것은 우물의 하부구간에서 균열 확장이 발생된 것으로, 사후 공내 TV검층 결과나 압력강하의 규모로 보아 상당한 규모의 파쇄가 발생된 것으로 추정된다. 52 kg/cm²에서 2 kg/cm²의 압력강하를 보인 2번째 파쇄대의 확장현상은 우물의 상부구간에서 주로 발생한 것으로 압력이 급강하하지 않은 점과 강하폭이 2 kg/cm² 정도에 불과하므로 그 확장범위는 크지 않은 것으로 보인다. 지하 27 m에서 실시한 2단계 시험에서도 압력은

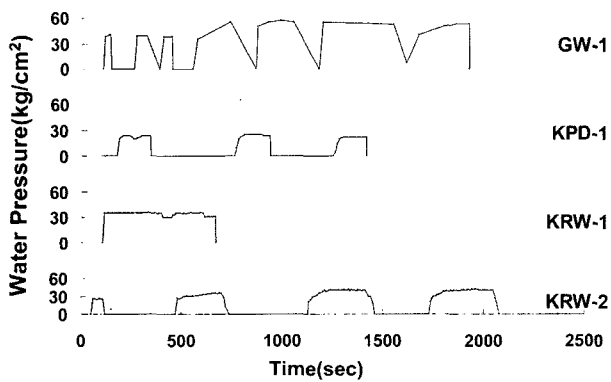


Fig. 4. Change of injection pressure during hydraulic fracturing in metamorphic rocks.

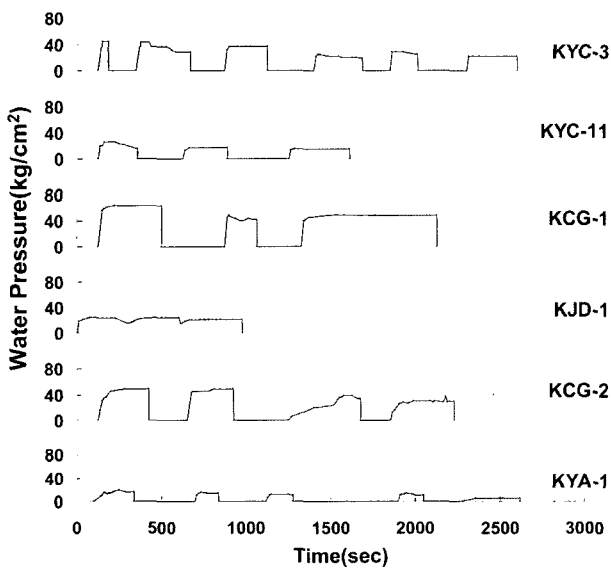


Fig. 5. Change of injection pressure during hydraulic fracturing in sedimentary rocks.

45 kg/cm²로 계속 유지되는 것으로 보아 상부구간에서 발생한 파쇄대의 확장현상은 지하 39 m구간에서 지하 27 m 상부구간까지 확장되었을 것으로 추정되었다.

Fig. 3, 4, 5는 화성암, 변성암, 퇴적암에서의 전체 주입 압력의 변화를 나타낸 것이다. 암종별로 주입압력의 정도는 다르지만 모두 특징적인 압력 강하를 보여준다. 압력의 강하는 파쇄의 생성 또는 재개구를 나타낸다. 그리고 현장에서의 간접적으로 파쇄의 유무를 판단할 수 있는 방법은 1단계 수압파쇄시 케이싱을 통하여 지표로 탁류가 토출되는 것으로부터 알 수 있는데 이것은 팩커설치 구간의 상하부에 있는 파쇄대가 연결된 것으로, 주입수로 깨끗한 물을 사용하였으므로 토출된 탁류는 파쇄내의 막힘

Table 3. Hydraulic physical parameters of test wells

Test Well	Specific capacity (m ³ /d)	Transmissivity (m ² /d)	Storativity	Remark
G-1	12.9	16.8	2.4E-05	HF이전
	19.9	26.6	3.3E-05	HF이후
	+54.3%	+58.1%	+37.5%	변화율
IW-4	0.8	0.34	2.9E-04	HF이전
	1.3	0.61	3.2E-04	HF이후
O-9	+62.5%	+79.4%	+10.4%	변화율
	1.5	0.81	9.4E-04	HF이전
	2.3	1.50	7.0E-03	HF이후
O-6	+53.3%	+85.2%	+644.7%	변화율
	0.8	-a	-	HF이전
	2.4	-a	-	HF이후
O-7a	+200%	-	-	변화율
	1.2	-	1.11E-04	HF이전
	2.0	-	1.78E-04	HF이후
O-10	+66.7%	-	60.4%	변화율
	0.5	-	1.30E-03	HF이전
	2.3	-	3.95E-03	HF이후
MW-7	+360%	-	203.8%	변화율
	0.2	-	2.21E-03	HF이전
	0.2	-	5.91E-03	HF이후
KYS-1	0%	-	167.4%	변화율
	3.7	1.55	4.6E-05	HF이전
	4.4	2.31	1.2E-04	HF이후
KYS-2	+18.9%	+49.0	+160.9%	변화율
	10.3	8.5	4.6E-03	HF이전
	12.8	10.5	5.8E-03	HF이후
GW-1	+24.3%	+23.4%	+25.2%	변화율
	2.3	9.69	2.2E-05	HF이전
	6.1	2.66	7.8E-06	HF이후
KPD-1	+165.2%	-72.5%	-64.5%	변화율
	5.5	6.15	1.7E-04	HF이전
	11.2	11.43	1.5E-04	HF이후
KRW-1	+103.6%	+85.8%	-11.8%	변화율
	48.0	35.39	2.1E-03	HF이전
	80.5	49.42	3.2E-03	HF이후
KRW-2	+67.6%	+39.64%	+52.4%	변화율
	29.6	18.01	9.5E-04	HF이전
	58.3	29.96	1.4E-03	HF이후
KYC-11	+96.9%	+66.35%	+47.4%	변화율
	0.8	1.42	-	HF이전
	3.6	3.05	-	HF이후
KJD-1	+350%	+114.9%	-	변화율
	1.6	0.5	9.1E-05	HF이전
	1.7	0.6	9.9E-05	HF이후
KYC-3	+6.3%	+20%	+8.8%	변화율
	0.5	0.24	1.3E-04	HF이전
	0.7	0.56	3.7E-04	HF이후
	+40%	+133.3%	+184.6%	변화율

Table 3. continued

KCG-1	1.2	0.7	1.0E-03	HF이전
	0.7	0.14	1.3E-04	HF이후
	-41.7%	-80.0%	-86.5%	변화율
KCG-2	0.5	0.15	1.9E-04	HF이전
	0.5	0.24	4.0E-04	HF이후
	0%	+60%	+110.5%	변화율
KYA-1	7.0	5.23	7.3E-04	HF이전
	8.5	6.02	7.4E-04	HF이후
	+21.4%	+15.1	+1.4%	변화율

a: Not calculated.

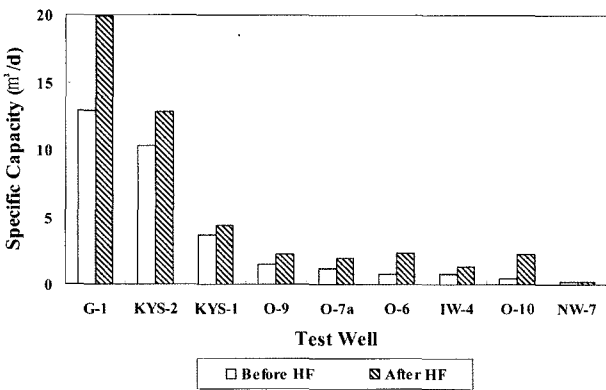


Fig. 6. Results from pumping test in igneous rocks (HF: Hydraulic Fracturing).

물질을 함유한 것으로 볼 수 있다. 수압파쇄를 실시한 후 공내 청소를 위하여 수중펌프를 깊은 심도까지 설치하여 양수를 실시하였다. 양수 초기에는 탁도가 매우 높은 진흙물이 토출되었으며 이후에는 다량의 모래 및 운모류 등이 물에 섞여 토출되었다. 대략 2일에 걸쳐 50~70 m³/d의 양수율로 지속적인 양수를 실시한 결과, 탁도 0.4 NTU 내외인 맑은 물이 토출되었다. 이때 지하수와 함께 토출된 점토류 등의 막힘 물질들은 파쇄대 및 절리 등의 파쇄대에 협제되어 있던 물질들로 추정되며 수압파쇄시 고압수의 주입과 압력해제를 번갈아 실시할 때, 파쇄 생성 및 확장이 이루어지면서 불연속면에서 이탈되어 배출된 것으로, 이들이 제거되면서 대수성이 상당히 개선된 것으로 판단된다.

Table 3은 화성암, 퇴적암, 그리고 변성암에서의 양수시험 결과를 나타내고 있다. Fig 6, 7, 8는 수압파쇄 전후의 각 암종별 비양수량, 변화를 나타내고 있다. 화성암류와 변성암류에서는 비양수량이 20~160%, 평균 61.2% 증가하였고 퇴적암류의 경우에는 -40~30%, 평균 12.4% 증

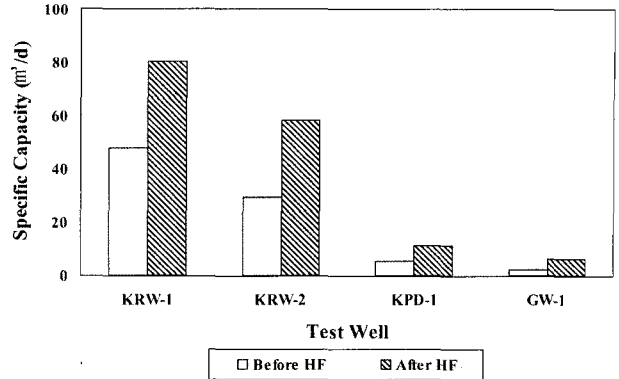


Fig. 7. Results from pumping test in metamorphic rocks (HF: Hydraulic Fracturing).

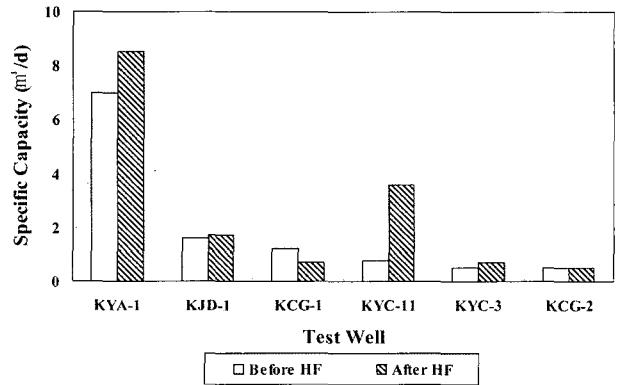


Fig. 8. Results from pumping test in sedimentary rocks (HF: Hydraulic Fracturing).

가하였고 관정에 따라 비양수량이 수압파쇄 이전보다 줄어드는 관정도 존재하였다. 퇴적암류에서 비양수량, 투수량계수, 그리고 저류계수가 줄어드는 이유는 암석의 특성상 파쇄대에 조립질 암석이 고압으로 인해 파쇄대를 폐쇄시키는 것으로 사료된다.

수압파쇄 시행 전후에 실시된 양수시험을 통하여 전체 암종에 대한 비양수량, 투수량계수, 저류계수의 결과를 비교해보면 비양수량이 평균 79.5% 증가 하였으며 투수량계수와 저류계수도 각각 평균 45%, 101% 증가하였다. 암종별 시험 결과를 보면 Table 4와 같다.

암종별 비양수량은 화성암류와 변성암류에서 약 100% 정도 증가하였다. 투수량계수와 저류계수도 두 암류에서는 크게 증가하였다. 반면에 퇴적암류는 비양수량, 투수량계수, 저류계수모두 작은 증가를 보였다. 하지만 전체 평균을 계산하여 보면, 비양수량, 투수량계수, 저류계수 모두 증가한 것을 알 수 있다. 이 시험을 근거로 암종별로 약간의 차이가 있지만 인공수압파쇄를 적용하면 거의 모든

Table 4. Comparison of hydrological characteristics increase before and after hydraulic fracturing

Type	Average specific capacity increase (%)	Average transmissivity increase (%)	Average storativity increase (%)	Numbers of test well
Igneous rocks	+93.4	+58.7	+84	9
Metamorphic rocks	+103	+56	+183	4
Sedimentary rocks	+42.2	+20	+37	6
Total average	+79.5	+45	+101	19

암종에서 비양수량 증가를 볼 수 있을 것으로 사료된다.

5. 결론 및 토의

수압파쇄기법의 적용결과 인공적인 균열발생 및 파쇄대 확장에 의한 수리적 연결성 확대와 관정내 이물질 제거 등의 효과에 의하여 비양수량, 투수량계수, 그리고 저류계수의 증대효과가 양호하게 나타났다. 총 19개소에서 시행한 수압파쇄기법의 적용 결과는 암종에 따라 서로 다르게 나타났다. 평균적으로 화성암, 변성암에서의 산출량 증대효과가 퇴적암류 지역에서 보다 월등한 것으로 나타났는데, 퇴적암류 지역에서는 확장된 파쇄대가 주입되었던 압력의 제거 후에 다시 밀폐 또는 파쇄작용에 의해 생성된 모암 파편들이 기존의 파쇄대 틈을 메워서 지하수 유통통로 또는 저류공간인 유효 공극이 감소된 것으로 사료된다. 추후 퇴적암에서 파쇄대의 밀폐현상을 방지하기 위한 첨가제의 주입기법 개발을 위한 연구를 수행할 예정이다.

수압파쇄기법은 관정의 산출량증대 뿐만 아니라 우물의 개량(developing)과 재개량, 관측정의 개량, 채수정의 개량, 시추 공내에서 제반 수리시험, 오염대수층의 정화, 지열을 이용한 heat-pump system에 적용이 가능하여 여러 분야에서 연계되어 사용될 수 있다.

결론적으로, 수압파쇄기법을 사용하여 지하수 산출량 저하로 인해 폐기된 관정의 재생 및 재활용 기술개발과 기존 관정의 활용성을 재고하여 지하수자원 이용을 극대화하며, 대수층 종류에 따른 관정의 우물 효율의 극대화로 내구년수를 증대시켜 효율적인 지하수 이용·관리를 도모할 수 있다.

사 사

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(대수층 활용 상수도 공급 시스템 개발, 과제번호 3-4-2)에 의해 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다. 또한 현장 시험과 자료정리

에 도움을 주신 (주)한서엔지니어링의 윤윤영 부사장, 전재수 과장, 그리고 한국수자원공사 조사기획처 백건하 과장님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

건설교통부, 한국수자원공사, 2003, 지하수조사연보, p. 301-327.
 대한광산지질학회, 1992, 지하수자원의 활용과 보전, 제8회 공동 학술강연회, 대한지질학회, p. 114.
 백건하, 김형수, 윤윤영, 전재수, 2003, 수압파쇄기법에 의한 우물 산출성 증대효과 검증, 2003년 한국지하수토양환경학회 총회 및 춘계학술발표회, 한국지하수토양환경학회, 경원대학교, p. 283-286.
 서울특별시, 1996, 지반조사편람, p. 84-87.
 정창희, 1986, 지질학개론, 박영사, p. 585-589.
 한정상, 안종성, 윤윤영, 김형수, 백건하, 2002, 인공수압파쇄기법에 의한 지하수 양수량 증대, 지하수토양환경, 7(2), 23-33.
 ASTM, 1997, Standard Test Method for Determination of the In-Situ Stress in Rock Using the Hydraulic Fracturing Method, ASTM, PA, USA, p. 6-11.
 Baski, H., 1987, Hydrofracturing of water wells, *Water Well Journal*, 41(6), p. 34-35.
 Clark, J.B., 1949, A hydraulic process for increasing the productivity of wells, *Petroleum Transactions of the AIME*, 186, p. 1-8.
 Gale, J.E., 1982, Assessing the Permeability Characteristics of Fractured Rock, *Geological Society of America*, Special Paper, 189, 163-181.
 Hubbert, M.K., 1972, Natural and induced fracture orientation, Underground Waste Management and Environmental Implications, *AAPG Memoir 18*, American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, OK, p. 235-238.
 Koenig, L., 1960, Economic aspects of well stimulation, *Journal American Water Works Association*. 52(5), 613-637.
 Macaulay, D. 1987, Hydro-fracturing the hard rock well, *Groundwater Age*, 21(7), 22-25.
 Swanson, G., 1986, Inflatable packers, *Water Well Journal*,

40(4), 49-52.

Waltz, J.P., 1988, Hydro-frac basics, *Groundwater Age.*, **22**(7), 26-29.

Williamson, W.H. and Wooley, D.R., 1980, Hydraulic Fracturing to Improve the Yield of Bores in Fractured Rock, *Australian Water Resources Council Technical Paper 55*, Australian Government Publishing Service, Canberra, Australia.