

## 수압파쇄기법에 의한 우물 산출성 증대효과 검증

백건하 · 김형수, 윤윤영\* · 전재수\*

한국수자원공사 수자원연구소, \*한서엔지니어링  
email : ghbaek@kowaco.or.kr

### 요 약 문

국내의 12개소 저산출 우물을 대상으로, 외국의 유정들에서의 산출량 증대를 위하여 많이 사용되고 있는 인공수압파쇄 방법을 적용하여 산출성 증대 효과를 검증하였다. 12개소에 대하여 수압파쇄시험 전후로 양수 시험을 실시하여 투수성 증대 등의 효과와 비양수량을 정량적으로 평가한 결과, 비양수량의 경우 전체적으로 평균 약 45%의 증가하였으며 투수계수 또한 약 26%가 증가하였다. 이러한 결과는 인공수압파쇄 방법이 대수층내 열극의 생성 혹은 확장 및 균열내의 막힘(clog) 물질 제거를 통해 투수성을 상당히 개선시킨 것으로 평가된다. 특히, 현재까지의 시험 결과, 퇴적암류 지역에서 보다 화성암류 지역에서의 시험 결과가 양호하게 나타났다. 화성암 지역에서 개발된 홍천에서의 사례를 볼 때, 고압의 주입을 통하여 상부 및 하부의 파쇄대가 확장 연결되고, 이들 파쇄 열극에 부착된 광물학적, 생물학적 막힘 물질이 제거되면서 산출성이 증대되는 것으로 나타났다.

**주요어** : 인공수압파쇄, 막힘(clog) 물질, 투수량 증대, 균열성 대수층

### 1.서론

지하수법 제정 이후, 무분별한 지하수 개발은 많이 줄었지만 아직도 체계적인 조사 없이 시행한 지하수개발에 의한 폐공 발생, 관리 미흡에 의한 산출성 저하 등으로 지하수 이용 효율 감소 등이 발생되어, 지하수에 대한 지속적인 이용과 관리에 문제점으로 지적되고 있다. 특히 국내 암반 균열성 대수층의 경우, 지층 내 단열의 발달 미흡, 불균질성 및 이방성 등으로 수리적인 연결성이 저조하여 인접한 위치에서도 우물의 산출성에 큰 차이가 나타나는 사례가 빈번하다. 따라서, 이와 같은 문제를 가진 정호에 대하여, 빈약한 산출성을 증대시키고 신규 굴착을 억제하며, 폐공 발생 요인을 감소시키기 위하여, 산출성이 저하된 외국의 유정(油井)에서 응용되고있는 인공수압파쇄(Hydraulic Fracturing, HF) 기술을 국내 균열성 대수층 정호에 적용시켰다. 본 연구의 목적은 국내 균열성 대수층 정호에 대한 수압파쇄 실증 시험을 통해 실질적인 우물의 산출성 증대 효과를 검증하고 인공수압파쇄와 관련된 기술을 보완, 발전시키기 위한 목적으로 수행되었다.

본 연구를 통해, 현재(2003년 3월 기준)까지 수행된 인공수압파쇄 시험은 총 12회이며, 앞으로 8회 내외의 실험을 추가로 계획하여 총 20회의 인공수압파쇄 시험을 시행하고자 한다. 객관적인 인공수압파쇄 기술 효과를 검증하기 위하여, 시험 이전에 대상 정호에 대한 활용 가능한 지층 주상도를 검토하고 TV 검층을 실시하여, 정확한 균열 대상 구간에 대하여 팩커를 설치 할 수 있도록 조치하였다. 한편, 정확한 산출성 증대 효과를 비교하기 위하여 수압파쇄 전후에 대수성 시험을 실시하여 투수계수 및 비양수량 등의 수리인자 변화를 분석하였으며, 활용 가능한 인접 관측공에 대해서는 인공수압파쇄가 수행되는 동안의 수위 변화 등의 영향을 조사하였다. 또한, 수압파쇄후 재차 TV 검층을 실시하여 파쇄대 구간의 변화를 관찰하여 이들 수압파쇄에 의한 변화를 정성적으로 평가하고자 하였다.

## 2. 수압파쇄 개요 및 시험장비 사양

인공수압파쇄 기법은 정호내 팍커를 설치하여 특정 구간에 고압의 물을 암반의 한계 인장 응력보다 큰 압력으로 주입하여 균열성 암반 대수층에 새로운 열극을 만들어 지하수의 인공 유동통로를 만들거나, 기존의 파쇄대어의 열극 구조를 확장하고 열극내의 막힘 물질을 제거함으로써 대수층내 유로의 기능을 증대시키는 방법이다. 기존의 열극을 확장시키기 위해서는 우물내 적용 지점에서의 상재 하중(지압) 보다 큰 심도 1m당 0.23kgf/cm<sup>2</sup>의 압력을 주입하여야 하며, 신규로 열극을 설치하기 위해서는 통상적으로 140~210kgf/cm<sup>2</sup> 정도의 압력으로 주입이 이루어져야 한다. 금번 연구에서 적용된 수압파쇄장비의 사양은 다음 표 1과 같다.

표 1. 시험 수행 인공수압파쇄장비 사양

장비명	주요내용	대수
-고압주입펌프	140kgf/cm <sup>2</sup> , 350 ℓ/분, 3연 plunger pump	1대
-수동유압식 팍커확장펌프	인장팍커 최대 700bar	1개
-Frac-Packer <sup>TM</sup> (인장팍커 PK-4075)	7.5"OD, 8"-8.75" 우물용(700 bar-용) 5.5"OD, 6"-6.75" 우물용	1set
-Inflatable Packer	6" 및 8" 우물용(BASKI社)	각 1set
-Frac-pipe	S38 고압 SS drill pipe 1.5"×3m	20본
-유압 윈치	1.3ton, 1/4" cable	1개
-물탱크	2m <sup>3</sup>	1개

## 3. 암종별 수압파쇄 효과 분석

12개소의 우물에서 실시한 인공수압파쇄 시험 자료 분석을 통하여 이들 기법에 의한 우물의 산출성 증대효과를 검토하였다. 특히 암종에 따른 수압파쇄 효과 유무 및 정도를 알아보기 위하여, 최대한 다양한 암석으로 구성된 우물에서 시험을 실시하고자 하였다. 12회의 시험 중 화성암류 지역(용결응회암 등 포함)에서 7회, 퇴적암류 지역에서 4회를 실시하였으며, 변성암류 지역에서는 시험대상 우물의 선정이 곤란하여 1회만 실시되었다.

표 2. 암종별 인공수압파쇄 시행 결과

암종	구분	양수율 (m <sup>3</sup> /day)	수위강하 (m)	비양수량 (m <sup>3</sup> /day/m)	투수량계수 (m <sup>3</sup> /day)	저유계수	비고
화성암류	시험전	51.17	21.72	5.69	6.21	1.3 E-03	-시험개소: 7개소
	시험후	59.80	12.01	8.12	8.33	2.1 E-03	
	증감율(%)	16.86	-44.7	42.65	34.1	66.7	
퇴적암류	시험전	27.25	41.55	0.95	0.39	3.7 E-04	-시험개소: 4개소
	시험후	32.30	42.66	0.92	0.53	2.5 E-04	
	증감율(%)	18.53	2.67	-3.93	36.4	-31.9	
변성암류	시험전	77.00	33.15	2.32	6.85	5.2 E-05	-시험개소: 1개소
	시험후	62.2	10.13	6.14	4.89	7.6 E-06	
	증감율(%)	-19.22	-69.4	164.7	-28.6	-85.3	
전체평균	시험전	45.35	29.28	3.83	4.33	8.7 E-04	총12개소 시험시행
	시험후	50.83	22.07	5.55	5.44	1.3 E-03	
	증감율(%)	12.09	-24.6	44.9	25.9	51.9	

수압파쇄 시행 전후에 실시된 양수시험을 통하여 비양수량, 투수량계수 및 저유계수를 산정한 결과 평균 비양수량이 3.83 m<sup>3</sup>/day/m에서 5.55 m<sup>3</sup>/day/m로 평균 45% 정도의 증대효과를 보였으며(최대 7.1 m<sup>3</sup>/day/m 증가), 투수량계수에서도 약 26% 증가를 보여 대수층에서의 투수성이 분명하게 개량된 것으로 나타났다. 암종별 시험결과를 보면 화성암류 지역에서 비양수량이 평균 5.69 m<sup>3</sup>/day/m에서 8.12 m<sup>3</sup>/day/m로 약 43% 정도가 증가한 것에 비해 퇴적암류에서는 비양수량에서 큰 변화를 보여주지 않았다. 투수성에서는 퇴적암류 구간에서도 일부 개선된 것으로 나타났으나, 이것은 절대량으로 볼 때 매우 적은 값으로 일부는 해석상의 오차에 기인

하는 것으로 판단된다(표 2 참조).

#### 4. 화성암류 지역에서의 수압파쇄 사례 소개

강원도 홍천군에 소재한 샘물 공장의 감시정을 대상으로 수압 파쇄를 실시하였다. 본 지역은 주라기의 대보 화강암으로 조립질 흑운모화강암 및 우백질 화강암으로 구분된다. 광물 조성상, 흑운모 화강암은 석영입자를 많이 함유하여 풍화에 강한 편이고, 우백질 화강암은 흑운모와 석영의 함량이 적고 장석분이 많아 상대적으로 풍화에 약한 특성을 보이고 있다. 특히 시험 우물의 파쇄대를 형성하고 있는 구간은 대부분 우백질 화강암대로 절리면에 협재된 물질도 장석류의 풍화에 따른 점토분이 많을 것으로 추정된다. 시험정은 개발 심도가 230 m인 심정으로 암반부인 지하 12.08 m이하는 8" 로 굴착되었으며 나공의 상태이다. 수압파쇄전의 지하수위는 지표하 6.72 m이며, 사전 TV 검층 결과, 20.0~21.0 m, 30~33 m, 37.63 m, 51.4 m, 73.6 m, 88.5 m, 106~107.7 m 및 191 m 구간 등에 파쇄대가 분포하고 있는 것으로 나타났다.

수압파쇄시 주입수에 의한 인근 지역의 수리 영향을 파악하고자 시험 우물에서 110 m 정도 떨어진 다른 감시정에 자동 수위/수온 관측기를 설치하여 수위 및 수온을 측정하였다. 수압파쇄는 먼저 1단계로 심도 39 m에 2단계로 27 m에 각각 팩커를 설치하여 2회에 걸쳐 실시하였다. 시험시 주입압은 45 kg/cm<sup>2</sup>까지 상승하다가 40 kg/cm<sup>2</sup>로 압력강하가 발생하였는데 이때 일부 암반 파쇄 혹은 확장이 발생한 것으로 판단된다. 다시 물을 재주입하여 52 kg/cm<sup>2</sup>까지 올렸을 때 팩커 설치 구간에 암반 파쇄가 발생하여 케이싱 상단으로 탁수가 월류하면서 50 kg/cm<sup>2</sup>로 압력이 하강하였다. 27 m 구간에 팩커를 설치하여 실시한 2단계 시험에서는 45 kg/cm<sup>2</sup>에서 압력이 유지되면서 케이싱 상단으로 흐른 탁수가 월류되어 우물 붕괴의 가능성으로 시험을 종료하였다.

수압파쇄 효과 검증을 위하여 수압파쇄 전후로 대수성 시험을 실시하였다. 사전 양수시험은 38.5 m<sup>3</sup>/day의 양수율로 이루어졌으며, 사후 양수시험은 48.8 m<sup>3</sup>/day의 양수율로 시행하였다. 또한, 수위 강하는 Diver를 이용하여 측정하였다. 양수시험결과 양수율을 28.4% 정도 증가하여 실시하였음에도 양수시험 종료시의 수위강하는 47.58 m에서 36.53 m로 23.2% 감소하여, 비양수량으로 볼 때 67.5% 정도의 효율증대를 보였다. 또한, 투수량계수도 약 80% 정도 증가된 것으로 나타나 전반적인 수압파쇄에 의한 산출성 증대 효과가 양호하게 나타난 것으로 판단되었다(표 3 및 그림 1 참조).

열극의 확장 또는 생성은 1단계 수압파쇄시 지표로 케이싱을 통하여 탁류가 토출되는 것으로부터 알수 있는데 이것은 팩커설치 구간의 상하부에 있는 파쇄대가 연결된 것으로, 주입수로 청수를 사용하였으므로 토출된 탁류는 열극내의 막힘 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 m<sup>3</sup>/day의 양수율로 단속적인 양수를 실시한 이후에 탁도 0.4 NTU 내외인 맑은 물이 토출되었다. 이때 지하수와 함께 토출된 점토류 등의 막힘 물질들은 파쇄대 및 절리 등의 열극에 협재되어 있던 물질들로 추정되며 수압파쇄시 고압수의 주입과 압력해제를 번갈아 실시할 때, 열극생성 및 확장이 이루어지면서 불연속면에서 이탈되어 배출된 것으로, 이들이 제거되면서 대수성이 상당히 개선된 것으로 판단된다.

표 3. 홍천지역 인공수압파쇄 전후 대수성시험 결과

단계	채수율 (m <sup>3</sup> d <sup>-1</sup> )	지하수위(BGL,m)			비양수량 (m <sup>3</sup> d <sup>-1</sup> )	투수량계수 (m <sup>3</sup> d <sup>-1</sup> )	저류계수	비고
		자연수위	안정수위	수위강하				
사전	38.5	8.12	55.97	47.85	0.80	0.34	2.87×10 <sup>-4</sup>	
사후	48.8	7.58	44.11	36.53	1.34	0.61	3.17×10 <sup>-4</sup>	

\* 증감율 : Q≒+26.8%, SPC≒+67.5%, T≒+79.4%, S≒+10.5%

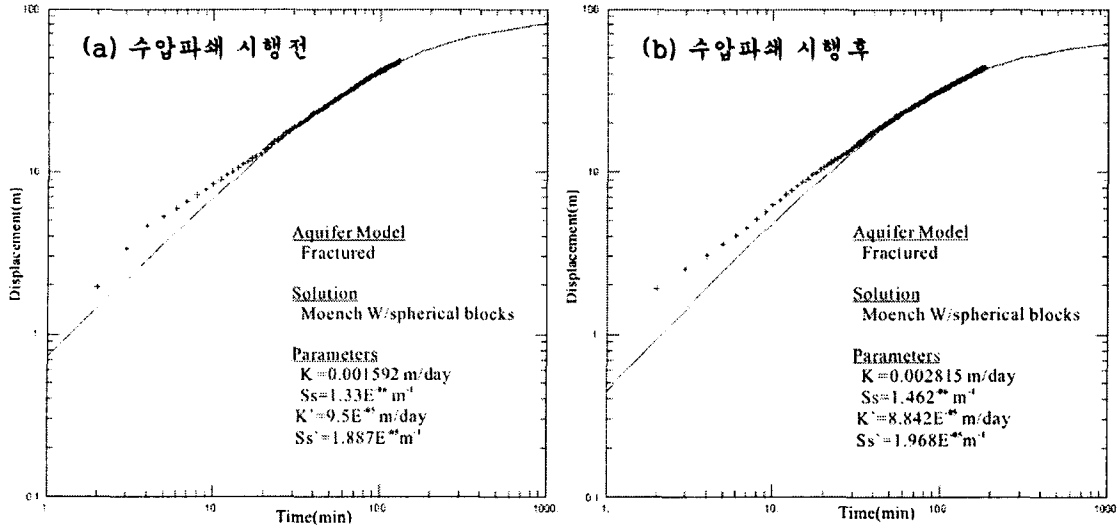


그림 1. 홍천지역 인공수압파쇄 전후 대수성시험 전산코드 해석 결과

## 5. 결론

12개소에서의 인공수압파쇄시험을 실시한 결과 인공적인 균열 발생 또는 열극확장에 의한 수리적 연결성 확대와 공내 이물질 제거 등의 효과에 의하여 비양수량 및 투수량계수 등의 산출성 증대효과가 양호하게 나타났다. 특히, 평균적으로 화강암류 지역에서의 증대효과가 퇴적암류 지역에서 보다 월등한 것으로 나타났는데, 이것은 퇴적암류 지역에서는 확장된 열극이 주입압 해소후 다시 밀폐되는 등의 원인에 기인하는 것으로 추정되는데 추후 이에 대한 규명이 필요할 것으로 생각된다. 앞으로 8개소 정도의 추가 시험을 통하여 보완연구를 실시하여, 국내에서의 수압파쇄 적용성에 대한 분석을 실시할 예정이다.

## 6. 사사

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단의 연구비지원(과제번호 : 3-4-1) 및 한국수자원공사의 신규 현물투자(임차)지원에 의해 수행되었다. 연구비를 지원해준 사업단 및 한국수자원공사 측에 감사드린다.