

## 인공수압파쇄 적용을 위한 울릉도 화산암류 저류특성 평가

김만일<sup>1\*</sup> · 장광수<sup>2</sup> · 석희준<sup>2</sup> · 김형수<sup>2</sup>

<sup>1</sup>안동대학교 지구환경과학과

<sup>2</sup>한국수자원공사 수자원연구원

### Assesment of the Characteristics of Hydraulic Storage in Volcanic Region for Applying the Artificial Hydraulic Fracturing - Ulleungdo Site

Man-II Kim<sup>1\*</sup>, Kwang-Soo Chang<sup>2</sup>, Heejun Suk<sup>2</sup>, and Hyoung-Soo Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Earth & Environmental Sciences, Andong National University

<sup>2</sup>Korea institute of Water & Environment, KOWACO

대수층 저류 특성을 이용하는 대수층 저장 및 회수(ASR) 기술의 현장 적용성 평가를 위해 화산암 지대인 울릉도 내에 다공성 매질인 부석층으로 이루어진 대수층을 대상으로 양수시험 및 인공수압파쇄시험을 실시하였다. 공내TV검층에서 확인된 GL-13 m와 GL-21 m의 주파쇄대 구간에서 수압파쇄실험을 각각 실시하였고, 또한 수압파쇄 전과 후로 나누어 양수시험을 수행하였다. 사전/사후 양수시험 결과, 증적층이 위치한 GL-13 m 하부에서는 수리적 연결성을 확인할 수 있었으나, 암반층 구간인 GL-21 m 하부에서는 파쇄대의 연결 상태가 다소 불량한 것으로 판단된다. 현장시험 결과를 종합해 보면, 조사지역내 인공함양 적용은 불리한 조건을 가지는 것으로 판단되나, 현장 실험이 특정한 지역에서 이루어져 있기 때문에 울릉도 전반적인 지역 내에 ASR 적용성 평가를 대표할 수 없다. 따라서 울릉도내 전반적인 ASR 적용성 평가를 위해서는 보다 광역적인 실험이 수행되어야 할 것으로 판단된다.

**주요어** : 인공수압파쇄, 대수성시험, 대수층 저장 및 회수기술

In order to establish the in-situ application of the artificial storage and recovery (ASR) technology which is used the property of the aquifer storage of groundwater. We carried out to the in-situ experiments such as borehole TV logging, pumping test and artificial hydraulic fracturing in volcanic island, Ulleungdo. In-situ experiments were conducted to divide the before- and after-hydraulic fracturing. Pumping test was achieved to confirm the two fracture zones, GL-13m and GL-21m, which are determined by the borehole TV logging. From the results of the before- and after-pumping tests, the hydraulic connectivity was confirmed to locate at GL-13m in the residual deposit zone of pumice media as alluvium. However, in the bedrock zone at GL-21m the hydraulic connectivity could be considered to faulty. Consequently, in this study area the artificial recharge has a little unsatisfied to geo-structural condition and desired to more detail investigation works.

**Key words** : Artificial hydraulic fracturing, Pumping test, Artificial storage and recovery (ASR)

#### 서 론

지속가능한 수자원 확보 노력의 일환으로 다양한 지하수 인공함양 방식을 통한 용수공급 방안이 대두되고 있는 가운데, 최근 미국을 중심으로 지하수 인공함양을 활용한 용수공급 방식인 대수층 저장 및 회수기술(aquifer

storage and recovery, ASR)의 효과가 실제적으로 검증되고 있다. 이 같은 지하수 인공함양기법은 대수층을 활용하여 수자원을 공급하고 관리하기 위한 적극적인 방안으로, 최근 유럽, 미국, 일본 등의 선진국들을 비롯해 수자원 확보에 어려움을 겪고 있는 개발도상국 등에서도 이 기술을 활용한 수자원 확보방안을 적극적으로 활

\*Corresponding author: mikim@andong.ac.kr

용하고 있다(김형수 등, 2003). 이 기법을 적용하기 위하여 주대수층을 형성하고 있는 지질매질의 파쇄대 연결성 등을 발달시키기 위한 방법으로 인공수압파쇄 (artificial hydraulic fracturing) 기법을 들 수 있다. 이 정호 재개발 기술의 하나인 인공수압파쇄 기법은 기존의 암반관정에 대해 주파쇄대 구간을 선정할 후 수압 확장팩터를 관정 내 설치한 후 주파쇄대를 대상으로 고압의 물을 주입함으로써, 단층져 있는 파쇄대의 틈을 인위적으로 넓게 하거나 차단되어 있는 파쇄대를 주위의 지하수를 다량 함유하고 있는 파쇄대와 연결시켜주는 방법 중의 하나이다(김만일 등, 2005; 김형수 등, 2005; EPA, 2004; 한정상 등, 2002). 지하수의 관정 효율성을 검토하기 위하여 인공수압파쇄시험 전과 후의 양수시험 등을 통해 관정의 효율성을 충분히 파악할 수 있다.

이와 같이 본 연구에서는 1개소의 시험정과 1개소의 관측정이 위치한 대상 지역에 인공수압파쇄 기법을 적용해 화산암류 대수층 저류특성을 평가하고자 하였다. 특히, 화산암 지역에서 대부분의 지하수를 함유하고 있는 다공질 매질인 부석층과 수직절리등에 대해 대수층 저장 및 회수(ASR) 기술의 적용 타당성 및 효율성 평가를 위해 인공수압파쇄와 양수시험을 병행하였다.

## 연구지역

### 지형 및 지질

연구지역인 울릉도는 포항에서 동북방향으로 217 km, 동해안에서 가장 가까운 죽변으로부터 140 km 떨어진 곳에 위치한 화산섬으로 동단 행남 동경 130° 55' 20", 서단 대평령 동경 130° 47' 37", 남단 가두봉 북위 37° 27' 27", 북단 선창 북위 37° 33' 01"에 위치해 있으며, 동서 길이 10.0 km, 남북 길이 9.5 km, 총면적 73.05 km<sup>2</sup> 으로 동해에서 가장 큰 화산섬이다. 울릉도는 울릉읍, 서면 및 북면의 3개 행정구역으로 구획되어 있으며, 임야가 55.48 km<sup>2</sup>로 전체 면적의 76%를 차지한다(울릉군, 2004). 울릉도는 화산활동에 의해 해상으로 분출된 오각형의 화산섬으로, 해발 984m의 성인봉이 중앙에 위치해 높은 분수령을 이루며, 나리분지를 제외하고 평균 25% 이상의 경사를 이루고 있다. Fig. 1은 울릉도의 지질분포와 연구지역의 관정 위치를 보여준다.

울릉도 전반에 관한 지표지질연구는 1977년 경상북도에서 실시한 '울릉도의 응용지질'에서 상세히 언급되어 있으며, 이후 한국수자원공사에서 1988년~1990년에 걸쳐 제주도 및 울릉도 지하수조사를 수행함으로써 화

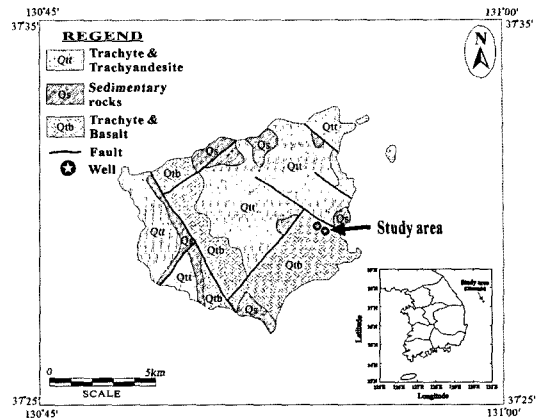


Fig. 1. Geologic map and location of the wells of the study area (Kim et al., 2001).

산섬에 대한 전반적인 지하수 대수층의 특성뿐 아니라 지구물리탐사 방법을 접목시켜 구조지질학적 특성도 파악하였다(한국수자원공사, 1988, 1989, 1990). 울릉도의 지질은 하부로부터 현무암질 집괴암 및 현무암류와 이들을 관입한 휘록암과 현무암질 암맥, 다시 이들을 덮고 있는 조면암질 집괴암, 라피리 오희암 내지 오희암, 조면암질 암류, 칼레라 퇴적층, 조면암질 안산암류로 구성되어 있으며, 다시 이들을 부정합으로 덮는 해안퇴적층과 테일러스로 피복되어 있다. 또한 울릉도를 가로지르는 북동남서 방향으로 발달한 대규모 단층인 봉래단층과 이와 거의 수직으로 형성된 도동단층이 주요 단층대로 나타난다. 화산 분출작용으로 인해 생성된 화산암의 특성을 그대로 가지고 있어 기공이 많은 다공질의 부석층이 부분적으로 다소 깊은 층적층을 이루고 있다. 울릉읍 주변에서 실시된 지구물리탐사 결과에 의하면 대수층 분포 심도는 대략 40~70 m 내외로 단층대 주변에 다공질의 부석층인 통구미층으로 이루어져 있어 이 층들이 울릉도의 주대수층을 이루고 있는 것으로 알려져 있다(한국수자원공사, 1990).

### 연구지역 위치

시험정은 울릉군 울릉읍 도동3리 소재 도동정수장 인근에 위치해 있으며, 본 지역의 상류부에 위치한 봉래폭포로부터 저동천이 진입로를 따라 곡류하는 지형적 구배를 가지고 있다. 암반관정은 약 9.3 m의 거리를 두고 2개소가 위치해 있으며, 굴착 당시 시추주상도에 의하면 양쪽 모두 GL-150.0 m 심도까지 굴착이 이루어진 것으로 보고되어 있다. 또한 층적층의 심도는 지표에서 GL-

8.7m까지이며, GL-8.7~18.0m까지 풍화암, GL-18.0~150.0m까지 경암으로 이루어져 있다.  $\phi 10''$ 강관 외부 케이싱과  $\phi 8''$ 강관 내부케이싱이 GL-8.7m까지 설치되어 있으며, GL-8.7~150.0m까지는 나공상태로 되어있다. 특히 강관 케이싱에는 총적 지하수 유입이 가능하도록 인위적으로 제작한 스트레나가 GL-8.7m까지 설치되어 있는 것으로 확인되었다. 또한 암반관정의 보호시설은 지표면에서 약 10cm 정도 높이를 갖는 콘크리트 박스 구조물로 제작되어 있어 하절기 강우에 의한 지표수 유입내지 침투가 지속적으로 발생될 것으로 판단된다.

**인공수압파쇄**

인공수압파쇄기술은 1940년대 후반 유정의 원유 생산량 증대를 위하여 처음으로 도입되었으며, 그 후 1960년대 중반 이후부터 지하수 저류능력 증대를 위해 현장에 적용되어져 왔다. 지하수 저류특성은 대수층내 분포하는 파쇄대의 발달 규모에 따라 크게 좌우된다. 따라서 이 기술은 균열이 불량한 파쇄암체를 대상으로 암체에 새로운 균열을 발달시키거나 기존의 균열을 확장시켜주는 기술이다(Yusa and Harrison, 2005; Hubbert, 1972). Yang *et al.*(2004)에 의하면 지반을 이루고 있는 불균질 암반은 수압파쇄시 초기압(initial pressure)과 파괴압(breakdown pressure)에 의해 균열의 진전이 최고에 이르며, 불균질 암반내 분포하는 균열이 수압파쇄시 이들을 따라 급격하게 발달되는 양상을 규명하였다. 특히 수압파쇄에 사용하는 주입 유체(specific fluid) 내지 물의 주입만으로 초기균열의 확장이 가능하다는 것을 화강암 입방체 공시체를 대상으로 실내 주입시험을 통해 균열의 발달 양상을 충분히 확인하였다(Ishida *et al.*, 1997).

암반 내 분포하는 파쇄대의 경우 지하수 유동이론인 입방체 법칙(cubic law)에 따르면 균열의 간격이 확장될 때 균열을 통해 유동되는 지하수량은 간격 확장율의 3승에 비례하여 증가한다. 따라서 인공수압파쇄기술은 상재하중으로 인해 지압을 받고 있는 암반의 한계 인장응력보다 큰 주입압으로 암반관정에 고압으로 물을 주입하여 암반관정 벽면에 새로운 균열을 만들어 내거나 미세한 균열을 확장시키는 것이다(Fig. 2).

즉, 선형 파괴역학에 따르면 균열 선단에서의 응력집중계수는 균열을 포함하는 매질의 파괴인성을 초과할 수 없기 때문에 이들 두 값이 서로 균형을 유지할 때까지 균열은 발달한다. 공내로 유체의 주입을 중지하면 균열 선단 주위의 압력이 증가하면서 균열 내의 압력은 감소하게 되는데, 이에 의해 균열 내의 유체압이 응력집중계

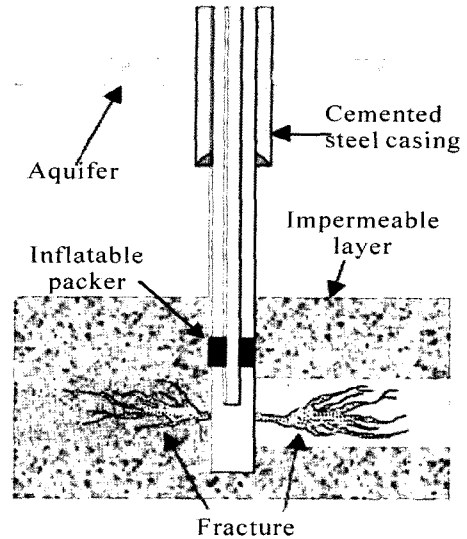
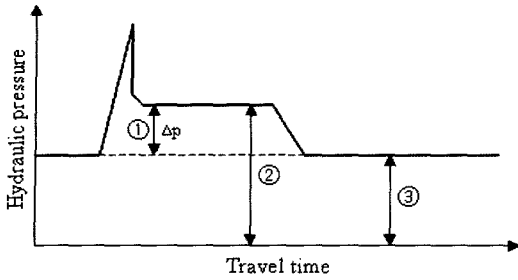


Fig. 2. Hydraulically fractured well using the hydraulic fracturing method (after IOGCC).

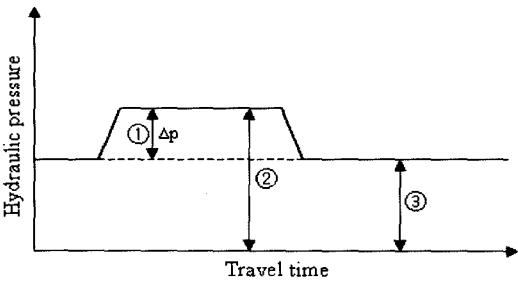
수와 파괴 인성값이 같아지는 수준으로 감소할 때까지 균열은 지속적으로 발달하게 된다(Legarath *et al.*, 2005; 최성웅, 1994). 일반적으로 소규모 균열이 이미 존재하고 있는 암체 내에서 이들 균열을 확장시킬 경우 필요한 주입압은 대략  $7\sim 28 \text{ kg/cm}^2$  (100~400 PSI)이면 충분한 것으로 보고되어 있다(과학기술부·한국수자원공사, 2004).

대수층에 대해 인공수압파쇄기술 적용의 궁극적인 목적은 암반 내에 형성되어 있는 1차 및 2차 이중 공극을 인공수압에 의해 개구시켜 유효공극률(effective porosity,  $n_e$ )의 증대 내지 이를 연결시킴으로써 지하수 산출량을 증대시키는데 있다. Fig. 3에서는 암반관정에서 인공수압파쇄를 수행하였을 경우 대수층을 가진 암반과 주입압의 유형에 대해 기술한 것이다(Rutqvist *et al.*, 2000). Fig. 3(a)의 경우 주입압인 파괴압에 의해 주변 암반이 파괴되어 기존 파쇄대가 열리게 될 때의 시간에 따른 주입압 변화를 나타낸다. 또한 Fig. 3(b)에서는 파괴압에 의한 파괴작용은 진행되지 않고 기존 파쇄대의 균열을 열리게 하는데 필요한 압력은 주입압과 같으나 Fig. 3(a)의 압력조건보다 다소 작은 압력 유형을 보이고 있다.

또한 파쇄대가 분포하는 지역에 설치된 암반관정의 경우 굴착된 관정 주변으로 파쇄 균열과 접촉되어 있기에 이러한 구간을 대상으로 확장팩터를 설치하여 인공수압파쇄가 주로 이루어진다. Fig. 4는 인공수압파쇄를

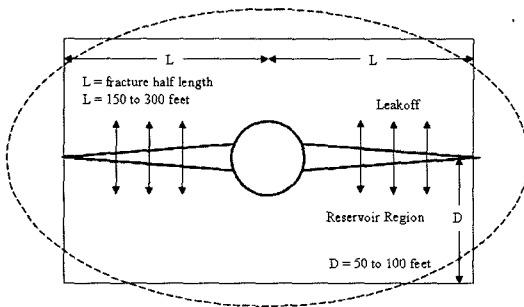


(a) Local block displacement due to



(b) Opening fracture zone due to

**Fig. 3.** Relationship between rock mass and hydraulic pressure: ① differential hydraulic pressure; ② hydraulic pressure of well at hydraulic fracturing range, ③ hydraulic pressure of groundwater resources.



**Fig. 4.** Plan view (looking down the well bore) of vertical, two-winged fracture showing the reservoir region invaded by fracturing fluid leakoff (EPA, 2004).

통해 관정 주변에 발생하는 균열의 형태를 보여주는 것이다. 이것은 확장팩커가 설치된 하단부에서 주입압에 의해 공벽 주변에 분포하는 약한 균열이 확장되는 형태를 나타내며 장시간 주입압이 유지된다면 이러한 균열 발생 범위가 증대되어 다른 형태로 분포하는 파쇄대와 연결이 이루어질 것이다. 결국 인공수압파쇄시 주입압에

의해 기존 파쇄대의 파괴 내지 개구 유형의 발생은 모두 지하수 저류능력을 증대시키는 효과를 가지고 있다.

### 연구 방법

화산암 지역에서의 인공수압파쇄를 통한 지하수 저류 가능성 파악을 목적으로 2004년 10월경에 제1차, 2005년 4월에 제2차 현장시험을 수행하였다. 연구수행 방법은 수중모터펌프를 인양한 후 인공수압파쇄시험을 기준으로 공내TV검층과 양수시험을 사전·사후로 나누어 실시하였다. 공내TV검층은 공벽에 분포하는 절리 내지 파쇄대 구간 등의 불연속면을 심도별로 확인하기 위함이며, 여기서는 인공수압파쇄시험을 통하여 대상 시험정에 대한 지하수 저류능력 증대 목적으로 인공수압파쇄용 확장팩커 설치 구간의 선정 및 수압파쇄시험 후 파쇄대 변형 여부를 파악하기 위하여 적용하였다. 공내TV검층 결과를 토대로 시험정의 주파쇄대 구간 및 지하수 유동 흔적을 파악한 후, 이 주요 구간을 대상으로 상단부에 비교적 파쇄대 흔적이 없는 신선한 공벽 구간에 확장팩커를 설치 운영하였다. 그 후 인공수압파쇄시험을 통한 지하수의 증대 발생 여부를 파악하기 위한 사전/사후 양수시험을 수행하였다.

본 시험연구에 사용된 장비는 기존 수중모터펌프를 인양하기 위해 크레인 1대와 인공수압파쇄 장비인 수맥확장기(Altras Inc.), 수압파쇄 확장팩커(직경  $\phi 6"$ , 길이 2.8 m), 주입수를 수맥확장기에 공급하기 위한 주입펌프, 수압파쇄 전과 후의 공내상태를 파악하기 위한 공내TV검층기, 양수시험용 수중모터펌프(LG 심정용 2HP 수중펌프, 15 kW, 구경 50 mm, LG전선(주))를 사용하였다. 그리고 지하수위 변화를 계측하기 위하여 자동수위 측정장치인 Hermit 2000(In-Situ Inc.)과 자동수위 측정기(Diver, Van Essen Instruments)를 함께 설치 운영하였으며, 또한 수동수위 측정기(측정길이 50 m, OTT Inc.)를 이용하여 시험정과 관측정에 대한 지하수위 변동을 수동으로 함께 측정하였다.

### 결과 및 토의

#### 공내TV검층

시험정에 설치된  $\phi 8"$  내부케이싱의 경우, GL-1.5 m 부근부터 케이싱 강관에 수직방향으로 길게 스트레너를 인위적으로 설치한 것을 확인할 수 있었으며, 또한 이 스트레너를 통해 공내로 지표수의 유입이 지속적으로 발

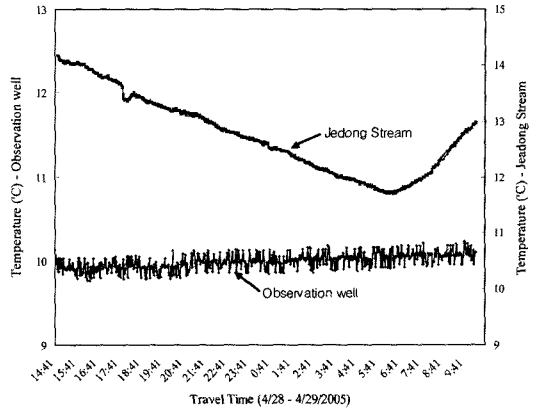
생되는 것을 확인하였다. 검층 결과, 지하수의 유동 및 함양에 관여하는 주요 파쇄대 구간은 크게 나누어 GL-14 m에서 GL-19 m 부근, GL-27 m에서 GL-45 m 부근에 집중적으로 분포해 있는 것으로 나타났다. 이것은 기존 수증모터펌프 및 자재를 인양한 후 실시된 사전 공내 TV검층 자료를 분석한 것이며, 인공수압파쇄시험 후 실시된 사후 공내TV검층 자료에서는 GL-18m~23 m, GL-36~44 m 부근에서부터 지하수의 운무현상이 심하여 공벽의 상태 파악이 거의 되지 않았다. 인공수압파쇄시험 후 발생한 지하수 내 운무현상의 원인은 고압으로 주입된 물이 시험정 주변의 파쇄대로 주입수가 강하게 침투하면서 파쇄대 균열 사이에 존재하는 광물 입자들 내지 침전물들이 주입압 감소에 의해 강제적으로 방출되어 발생한 것이다.

이러한 현상은 인공수압파쇄시험 후 파쇄대 구간에서 매우 심하게 발생되었으며, 이는 시험정이 위치한 지점에서 공벽에 대해 수직적으로 발달된 파쇄대 구간으로 추정할 수 있을 뿐만 아니라, 운무 정도에 따라 시험정 전 구간에 대한 지하수 유동 경향을 개략적으로 파악할 수 있을 것이다.

**양수시험**

양수시험의 목적은 시험정과 관측정에서 측정된 수위 및 수질 변화 자료를 해석하여 대수층 수리상수(수리전도도, 저류계수, 투수량계수 등), 대수층의 경계조건, 대수층의 누수 여부 등을 밝히기 위하여 수행되며, 또한 적정채수량을 산정하기 위하여 실시한다. 본 연구에서의 양수시험은 인공수압파쇄시험 후 대상 시험정의 양수량 증대 경향을 분석하기 위하여 인공수압파쇄시험을 기준으로 하여 사전/사후로 나누어 수행하였다.

우선적으로 지하수와 지표수의 수리적 관계를 파악하기 위하여 이들의 수온 변화를 측정하였다. 대상지역의 수온분포 특성 파악을 위해 관측정에서 약 10m 떨어져 있는 저동천과 관측정에 대해 2005년 4월 28일 14시부터 4월 29일 10시까지 자동수위 측정센서(Diver)를 이용하여 이들의 수온 변화를 측정하였다(Fig. 5.). 본 조사지역은 정오를 기준으로 오후부터 해가 들지 않는 곳이기 때문에 저동천에서 측정된 수온은 일몰에 가까워지면서 수온이 급격히 하강하다가 일출과 동시에 상승하는 경향을 보이고 있다. 그러나 관측정에서 측정된 지하수의 수온은 미미하게 상승하지만 저동천의 최저 온도와 관측정의 최고 온도와 비교해 약 2°C 정도의 온도차를 보일 뿐이다. 이는 저동천 상류부인 봉래폭포로부



**Fig. 5.** Variations of the water temperature at Jeddong stream and observation well (April 28, 2005~April 29, 2005).

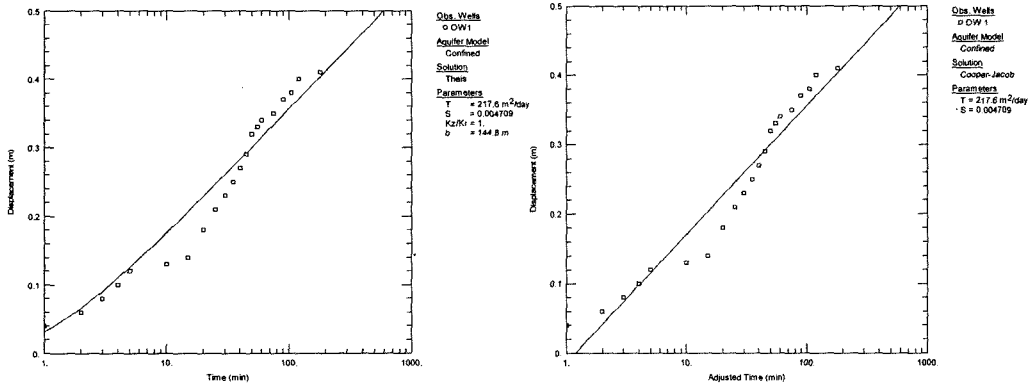
터 곡류하는 지표수와 조사지역 일대가 부석과 같이 풍화에 약한 풍화잔류토 등이 충전층을 이루고 있어 충전층 내 복류수와 지표수의 영향을 밀접하게 받는 것으로 사료된다. 이것은 공내TV검층에서 확인된 바와 같이 외부케이싱(설치심도 GL-1.5~8.7 m)에 설치된 스트레너를 통해 지속적으로 복류수 내지 지표수 등이 정호 내로 유입되고 있기 때문이다. 이러한 현상 상황을 고려해 볼 때 본 지역에서의 다공질 매질로 이루어진 부석 잔류층인 충전층이 분포하는 천부 지층에서는 국한적으로 지표수와 지하수가 상호 연결된 수리적 관계를 가지고 있다.

사전 양수시험은 2005년 4월 26일 16시경 기존의 수증모터펌프 및 자재를 인양한 후 수증모터펌프와 수위 관측관을 GL-30 m 위치에 설치하여 2005년 4월 26일 21시 50분부터 4월 27일 00시 50분까지 180분 동안 실시하였으며, 회복시험은 양수시험이 종료된 시점부터 4월 27일 08시 30분까지 수행하였다. 그리고 사후 양수시험은 4월 27일 16시 35분부터 동일 20시 정각까지 수행하여 시험이 종료된 시점부터 4월 28일 09시까지 회복시험을 수행하였다. 이때 양수량은 220 m<sup>3</sup>/day로 일정하게 유지하여 양수하였으며, 시험정과 관측정의 지하수위 변동은 수위 측정장비인 Hermit 2000 측정센서, 자동수위측정기(Diver) 및 수동수위측정기를 사용하여 동시에 함께 측정하였다.

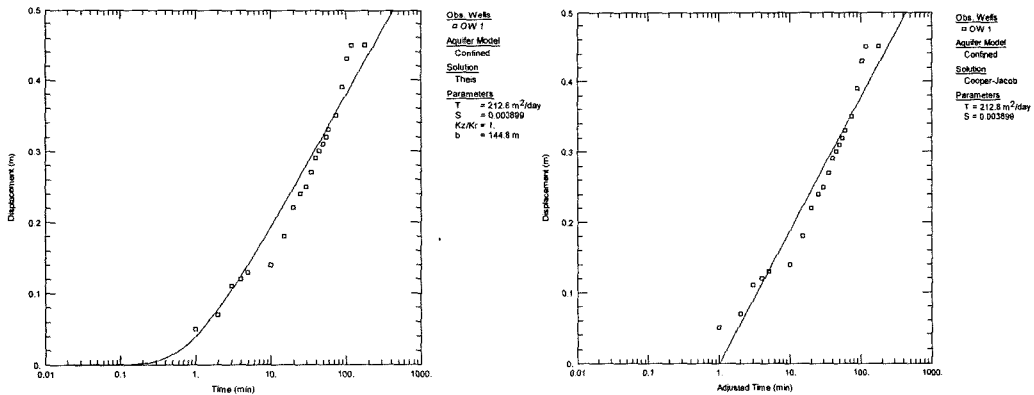
사전/사후 양수시험에서 취득된 시험정 및 관측정의 수리 물성치를 Table 1에 나타내었다. Fig. 6과 7은 사전/사후 양수시험에서 취득된 경과시간-수위강하 곡선도를 나타낸 것으로써 AQTESOLV for Windows Pro를

**Table 1.** Results of the aquifer in-situ test during the before- and after-pumping test.

Stage	Wellnumber	Pumping rate (m <sup>3</sup> /day)	Water levels (GL- m)			Specific capacity (m <sup>2</sup> /day)	Transmissivity (m <sup>2</sup> /day)	Storativity	Remark
			Static	Dynamic	Drawdown				
Before Test	PW-01	220	5.20	5.78	0.58	379.31	217.6	0.0047	Pumping well (PW)
	OW-01	-	4.35	4.76	0.41	-	-	-	
After Test	PW-01	220	5.05	5.77	0.72	305.56	212.8	0.0039	Observationwell (OW)
	OW-01	-	4.30	4.75	0.45	-	-	-	



**Fig. 6.** Result of the before-pumping test on the hydraulic fracturing before.



**Fig. 7.** Result of the after-pumping test on the hydraulic fracturing after.

사용하여 Theis 해석법과 Cooper-Jacob 해석법을 적용해 분석한 결과이다. 인공수압파쇄시험을 기준으로 하여 사전/사후 양수시험 결과를 비교해 본 결과에서 비양수량, 투수량계수 및 저류계수 등이 사전보다 사후시험 결과에서 약 18% 정도 감소한 것으로 나타났다. 이는 인공수압파쇄로 인해 기존 파쇄대 내 분포하고 있는 균열 내 협재된 암편 등과 같은 이물질이 균열 틈 밖으로 배출되지 못하고 시험정을 중심으로 방사형으로 암반 파쇄대 주변의 2차 유효공극에 잔류하여 막힘현상

(clogging)이 발생된 것으로 판단된다. 이러한 현상을 방지하기 위해서는 주입압과 주입율이 큰 인공수압파쇄 장비를 사용한다면 인공수압파쇄시험으로 인해 발생하는 공극 내 이물질의 잔류현상을 제거할 수 있을 뿐만 아니라 유효공극의 발달 진전 범위를 극대화하여 주대수층 내지 단절된 다른 대수층으로의 수리적 연결성이 가능토록 할 것이다. 그러나 이를 위해서는 우선적으로 대상 정호에 대한 공벽상태 및 주변 지질현황을 충분히 파악한 후 고압으로 분사되는 주입압과 주입율로 인한

공벽의 무너짐 현상을 방지할 수 있는 방안이 마련되어야 한다.

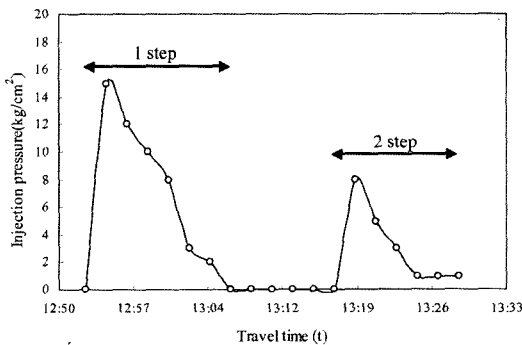
본 지역의 층적층 매질이 물을 원활히 침투시킬 수 있는 다공질의 부석층으로 구성되어 있을 뿐만 아니라 시험정에서 수압파쇄시험이 진행되더라도 직선거리로 약 9.3 m 이격된 관측정에서는 미미한 수위 변화만이 관측되었다. 이와 같은 수리적 현상은 암반 대수층의 파쇄대 구간이 주대수층을 이루는 파쇄대까지는 확장되지 못한 것을 의미한다. 또한 시험정 및 관측정에 인접한 저동천의 수온변화 관계를 조사한 결과도 마찬가지로 지하수와 지표수의 수온이 거의 비슷한 경향을 보임으로써 이들 관정의 지하수는 지표수 내지 복류수에 가장 크게 영향을 받는 것으로 사료된다.

**인공수압파쇄시험**

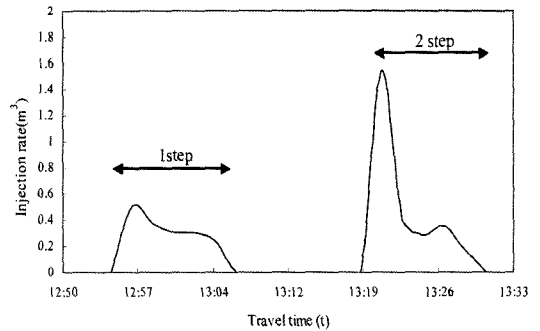
본 시험정에 대한 인공수압파쇄시험은 총 2단계에 걸쳐 수행하였으며, 제1단계 인공수압파쇄는 2005년 4월 27일 12시 53분에서 13시 05분까지 1차 수압파쇄, 2차 수압파쇄는 동일 13시 19분에서 13시 29분까지 실시하였다. 시험시 확장팩커의 설치심도는 사전 공내TV검층에서 확인한 시험정의 주파쇄대 구간 중 GL-13 m에 설치 운영하였다. 또한 제2단계 인공수압파쇄시험은 확장팩커를 GL-21 m 부근에 설치한 후 2005년 4월 27일 14시 23분에서 14시 47분까지 1차 수압파쇄 및 15시 00분에서 15시 13분까지 2차 수압파쇄를 연속적으로 실시하였다. 제1단계 인공수압파쇄시험 결과를 분석해 보면, 확장팩커를 GL-13 m에 설치한 후 1차 초기 주입압을 15 kg/cm<sup>2</sup>으로 유지하면서 실시하였다. Fig. 8에서와 같이 초기 주입압은 시간경과에 따라 급격하게 감소함을 알 수 있었으며, 약 14분 후 2차 주입압을 상승시켰으나 최대 8 kg/cm<sup>2</sup>까지 밖에 상승되지 않아 이를 최대

주입압으로 설정한 후 시험을 수행하였다. 1차 주입상태와 거의 비슷하게 초기 최대 주입압을 기준으로 볼 때, 주입시간의 경과에 따라 경시적으로 주입압의 급격한 감소를 확인할 수 있었다. 또한 1, 2차 수압파쇄시험에서 주입압 상승에 따라 관측정에서의 자연수위도 함께 증가함을 확인하였다(Fig. 10). 즉, GL-13 m에 확장팩커가 설치되어 있어 이 하부 전구간에서 주입압에 의해 주입수가 압축되어 연약한 파쇄대 내지 층적층과 인접한 구간에서 주입수의 이동 확산이 발생되어 관측정의 자연수위 상승이 측정된 것이다.

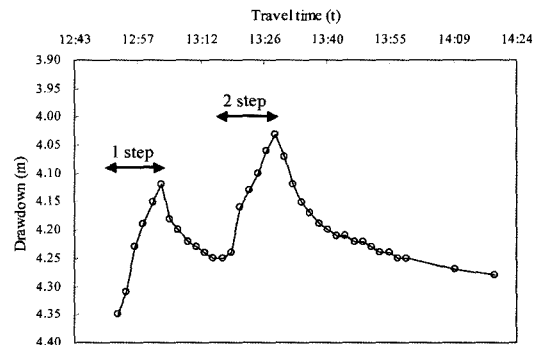
초기 주입압이 최종 주입압보다 월등히 높게 나타나는 원인은 주입수가 고압으로 초기 주입됨과 동시에 시험정 주변에 분포하는 연약한 파쇄대 내지 이들과 연결된 단허진 균열 등이 개구되는 것과 같은 물리적 현상에 의해 주입수가 이들 파쇄대를 통해 넓은 범위로 확산이 이루어지기 때문이다. 따라서 균열의 개구 범위가 발달되어 주입수의 주입범위가 확대됨에 따라 낮은



**Fig. 8.** Variations of the injection pressure at test well (The 1th stage of hydraulic fracturing).



**Fig. 9.** Variations of the injection rate at test well (The 1th stage of hydraulic fracturing).



**Fig. 10.** Variations of the water level at the observation well with the hydraulic pressure injection at test well (The 1th stage of hydraulic fracturing).

주입압에도 높은 주입량을 나타내는 것으로 판단된다. 이것은 Fig. 10에서와 같이 시험정과 약 9.3 m 떨어져 있는 관측정에서 주입수 주입과 함께 측정된 지하수위 변화만으로도 충분히 파악되었다. 인공수압파쇄시험 중에 관측정에서 측정된 지하수위는 서서히 상승하다가 주입이 종료됨과 동시에 다시 하강하는 것으로 나타났기 때문이다. 확장팩커가 설치되어 있는 심도가 GL-13 m로써 시험정이 위치한 지점이 층적층 내지 풍화된 암반지역임을 감안해 본다면, 시험정에서 주입과 동시에 관측정에서 지하수위 변화가 파악되기 때문에 이는 두 관정이 천부 지반에서는 상호 수리적 연결성을 가지고 있다고 볼 수 있다.

제2단계 인공수압파쇄시험은 동일한 시험정에 대해 제1단계 시험에서 확장팩커가 설치된 심도 GL-13 m보다는 8 m 낮은 GL-21 m에 설치하였다. 본 시험은 총 2차에 걸쳐 수행되었으며, 주입압, 주입량, 관측정의 자연수위 변화를 계속하였다. 1차 시험은 2005년 4월 27일 14시 23분에서 14시 47분까지 실시되었으며, 2차 시험은 15시 00분에서 15시 13분까지 수행하였다. 1차 시험시 초기 주입압을 32.0 kg/cm<sup>2</sup>까지 급격히 증가시켜 최종 주입압이 25.5 kg/cm<sup>2</sup>가 되었을 때 주입을 중단하였다(Fig. 11). 이 주입시간동안 2번에 걸쳐 순간적으로 주입압을 제거하였다가 급격히 주입압을 27.0 kg/cm<sup>2</sup>까지 상승시키면서 진행하였다. 그리고 19분이 경과한 시간에서 주입압의 증가를 위해 수맥확장기 엔진 회전수를 가속시켰다. 이러한 장비운영은 시험정 내 고압으로 주입된 주입수가 파쇄대로 침투하면서 기존 파쇄대 주변에 존재하는 암편들(풍화 광물입자 등의 이물질이 파쇄대 틈을 통해 침투하여 균열 틈을 막아버려 주입효과를 저하시키기 때문에 이러한 현상을 제거하기 위하여

주입압을 급격히 감소시킴으로써 파쇄대 내에 협재되어 있는 이물질의 제거효과를 극대화시키기 위함이다. 2차 주입은 1차 종료 후 13분이 경과한 다음에 초기 주입압 30 kg/cm<sup>2</sup>으로 설정하여 실시하였다. 약 10분이 경과하면서 주입압은 18.5 kg/cm<sup>2</sup>으로 감소하였다. 이것은 1차 주입시 시험정에 분포하는 파쇄대의 확장성이 2차 주입시 보다 증대한 것을 의미하는 것으로써 주입량의 증가를 의미한다(Fig. 9). 따라서 주입압과 주입량의 관계를 고려해 본다면 파쇄대 내에서 주입된 주입량의 변화를 단계적으로 파악할 수 있다(Fig. 13).

이상과 같이 1단계 시험에서 파쇄대의 특성을 고려해 수압파쇄 장비의 운영방법에 따라 주입압 및 주입량의 변화를 명확히 파악할 수 있었다. 또한 주입압의 감소에 따라 주입량 변화도 함께 감소하는 것으로 측정되었으며 주입압 및 주입량의 영향에 기인하여 관측정에서 측정된 지하수위 변화도 함께 측정되었다. 이러한 결과로

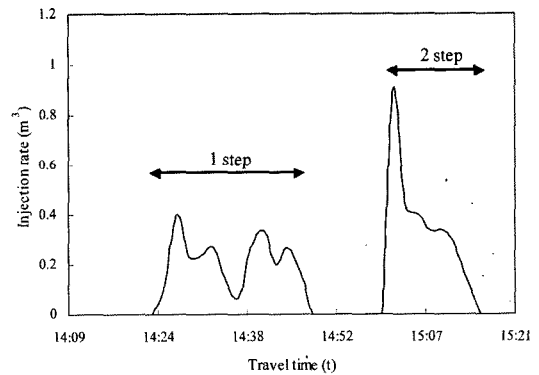


Fig. 12. Variations of the injection rate at test well (The 2th stage of hydraulic fracturing).

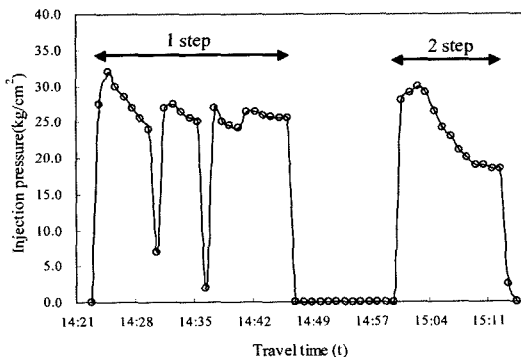


Fig. 11. Variations of the injection pressure at test well (The 2th stage of hydraulic fracturing).

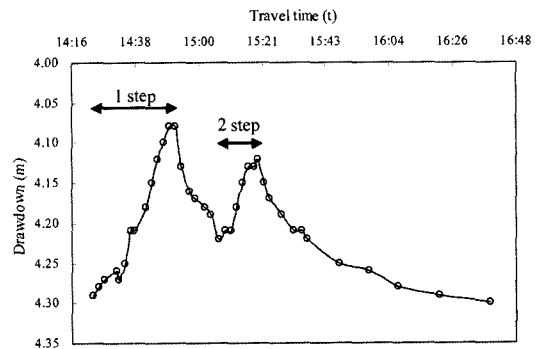


Fig. 13. Variations of the water level at the observation well with the hydraulic pressure injection at test well (The 2th stage of hydraulic fracturing).



부터 9.3 m 이격된 시험정과 관측정의 수리적 연결성은 천부 지반에서는 확인할 수 있으나 심부 지반에서의 연결성은 결여된 것으로 판단된다. 즉, 천부 지반의 경우 지표수의 유입을 차단하기 위해 설치한 강관 케이싱 주위로 스트레나가 GL-1.5 m부터 설치되어 있어 인근 저동천의 하천수 유입 내지 강우에 의한 지표수 침투가 발생할 가능성을 배제할 수 없는 실정이다. 결과적으로 볼 때, 두 관정의 수리 연결성은 GL-13 m에서의 1단계 시험 결과가 GL-21 m의 2단계 시험보다 지하수위 변화 내지 주입압 및 주입량이 다소 높게 측정되었다. 이는 다공질의 부석 매질로 이루어진 충적층과 풍화암 지대에서의 수리 연결성이 본 지역의 주요 대수층 역할을 수행하는 것으로 판단된다. 특히 조사지역이 저동천과 인접해 있어 지형 고도를 고려해 볼 때 본 지역의 주요 대수층은 지표수의 영향을 매우 크게 받고 있는 것을 확인하였다.

## 결 언

지반 내 지하수 저류특성을 이용하여 지하수를 저장할 수 있는 대수층 저장 및 회수(ASR)기술의 현장 적용성 평가를 위하여 다공질 매질을 가지고 있는 화산암 지대인 울릉도를 대상으로 양수시험 및 인공수압파쇄시험을 실시하였다. 인공수압파쇄시험은 공내TV검층에 의해 확인된 시험정의 파쇄대 구간이 양호한 2개 지점인 GL-13 m와 GL-21 m를 선정하여 실시하였으며, 공내 TV검층과 양수시험은 인공수압파쇄시험 전·후를 기준으로 수행하였다. 현장시험 결과로 볼 때 충적층은 두 지점 간에 밀접한 수리적 연결성을 갖고 있지만, 암반층은 파쇄대의 연결 상태가 다소 불량한 것으로 추정된다. 이는 암반대수층의 투수량계수가 작고, 저류계수도 작아서 인공함양에 있어 다소 불리한 조건을 가지고 있다는 것을 의미한다. 주변 지질매질의 상태로 볼 때 충적층 지반을 통해 인근 저동천 유역으로 급격히 주입수가 빠져 나가는 것으로 판단된다. 이러한 현상은 주변의 지질매질 상태를 고려해 알은 심도인 충적층과 풍화암 구간(GL-18 m 내)에 분포하는 다공성 매질층 내지 파쇄대에 의해 큰 영향을 받는 것으로 판단된다. 충적층의 경우에는 양호한 투수량계수를 가지고 있어 서로 연결된 수리시스템을 이루고 있지만, 주입수의 저장능력은 저동천과 수리 연결성이 발달되어있어 불량한 것으로 판단된다. 본 연구지역에서 관정 운영 및 관리를 확인한 바로는 두 암반관정의 위치가 직선거리로 약 9.3 m 정

도 밖에 떨어져 있지 않아 동시에 두 관정에서 양수를 할 경우 수리 간섭의 영향이 발생할 가능성을 가지고 있다. 특히 봉래폭포에서 곡류하는 저동천을 관정의 표고와 비교해 약 5.5 m 정도 아래에 위치해 있으며 이들 관정과 약 10 m 내외에 인접해 있는 것으로 보아 관정에 설치된 외부새부케이싱 스트레나를 통해 지속적으로 지표수 침투가 이루어지는 것으로 판단된다. 특히 인공수압파쇄시험 전·후에 실시된 양수시험 결과에서 수리물성치가 작게 나타난 것은 주입압이 낮아 충분히 파쇄대를 개구시키지 못하여 시험정 주변의 파쇄대와 연결이 이루어지지 않은 것으로 판단된다. 파쇄대의 개구 효율을 증대시키기 위해서는 보다 높은 주입압을 발생시킬 수 있는 수압파쇄 장비의 개발이 요구된다. 더욱이 본 현장시험은 기존의 암반관정을 사용하여 수행되었기 때문에 대상 관정에 대한 정확한 시추 정보 및 지질 자료 미비로 인해 충분한 시험이 이루어지지 않았을 것으로 생각되며, 인공함양 관련해 보다 체계적이고 정밀한 현장조사와 현장시험이 수행되어야 할 것으로 사료된다.

## 사 사

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단의 연구비 지원(과제번호: 3-4-2)에 의해 수행되었다. 연구비를 지원해 준 사업단 측에 감사드린다. 또한 본 연구를 위해 협조해주신 울릉군청 환경보전과 권태필 계장님과 관계자분에게도 감사드린다.

## 참 고 문 헌

- 과학기술부, 한국수자원공사, 2004, 수자원의 지속적 확보기술개발사업-지속가능한 지하수 개발 및 함양기술 개발, 850p.
- 경상북도, 1977, 울릉도의 응용지질, 78p.
- 김만일, 석희준, 김형수, Jeffrey Barry, 2005, 울릉도 대수층 저장 및 회수기술의 현장 적용성 평가, 한국지하수토양환경학회 춘계학술발표회논문집, pp.415-419.
- 김정찬, 고희재, 이승렬, 이창범, 최성자, 박기화, 2001, 1:250,000 강릉-속초 지질도폭 설명서, 한국지질자원연구원, 76p.
- 김형수, 김만일, 석희준, 2005, 인공함양 주입방식에 의한 암반대수층 저류특성 평가, 지질학회지, 41(3), pp. 415-426.
- 김형수, Jeff Barry, Larry Eaton, 2003, 대수층 저장 및 회수 (Aquifer Storage and Recovery) 기법을 활용한 수자원 확보 및 공급방안, 한국지하수토양환경학회 춘계학술대회, pp.267-271.
- 최성웅, 1994, 수압파쇄에 의한 인공슬롯모델의 균열전

- 과 양상 해석과 현지암반 초기지압측정, 박사학위논문, 서울대학교 대학원, 190p.
- 울릉군, 2004, 군정 주요기본 통계, 93p.
- 한국수자원공사, 1988, 울릉도 수자원 개발 타당성 조사 연구보고서, 83p.
- 한국수자원공사, 1989, 제주도 및 울릉도 수자원개발 타당성 지질조사 보고서, 272p.
- 한국수자원공사, 1990, 제주도 및 울릉도 지하수조사 보고서, 109p.
- 한정상, 안종성, 윤윤영, 김형수, 백건하, 2002, 인공수압 파쇄기법에 의한 지하수 양수량 증대, 한국지하수토양환경학회지, 7(2), pp.23-33.
- EPA, 2004, Evaluation of impacts to underground sources of drinking water by hydraulic fracturing of coalbed methane reservoirs, Final report, EPA 816-R-04-003, United States Environmental Protection Agency, 1200 Pennsylvania Avenue, NW, Washington, DC, referred to <http://www.epa.gov>.
- 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, pp.235-238.
- Interstate Oil and Gas Compact Commission (IOGCC), <http://www.iogcc.oklaosf.state.ok.us>
- Ishida, T., Chen, Q. and Mizuta, Y., 1997, Effect of injected water on hydraulic fracturing deduced from acoustic emission monitoring, Pure and Applied Geophysics, 150, pp.627-646.
- Legarh, B., Huenges, E. and Zimmermann, G., 2005, Hydraulic fracturing in a sedimentary geothermal reservoir: Results and implications, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 42, pp.1028-1041.
- Rutqvist, J., Tsang, C.-F. and Stephansson, O., 2000, Uncertainty in the maximum principal stress estimated from hydraulic fracturing measurements due to the presence of the induced fracture, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 37, pp.107-120.
- Yang, T. H., Tham, L. G., Tang, C. A., Liang, Z. Z. and Tsui, Y., 2004, Influence of heterogeneity of mechanical properties on hydraulic fracturing in permeable rocks, Rock Mechanics and Rock Engineering, 37(4), pp.251-275.
- Yusa, S. C. and Harrison, J. P., 2005, Development of a hydro-mechanical local degradation approach and its application to modelling fluid flow during progressive

fracturing of heterogeneous rocks, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 42, pp.961-984.

2006년 1월 4일 원고접수, 2006년 5월 26일 게재승인

#### 김만일

안동대학교 자연과학대학 지구환경과학과  
760-749 경북 안동시 송천동 388번지  
Tel: 054-820-5185  
Fax: 054-823-1627  
e-mail: mikim@andong.ac.kr

#### 장광수

한국수자원공사 수자원연구원 댐기술연구소  
305-730 대전광역시 유성구 전민동 462-1번지  
Tel: 042-860-0335  
Fax: 042-860-0592  
e-mail: pious18th@nate.com

#### 석희준

한국수자원공사 수자원연구원 댐기술연구소  
305-730 대전광역시 유성구 전민동 462-1번지  
Tel: 042-860-0334  
Fax: 042-860-0592  
e-mail: sxh60@kowaco.or.kr

#### 김형수

한국수자원공사 수자원연구원 댐기술연구소  
305-730 대전광역시 유성구 전민동 462-1번지  
Tel: 042-860-0330  
Fax: 042-860-0592  
e-mail: hskim@kowaco.or.kr