특 집

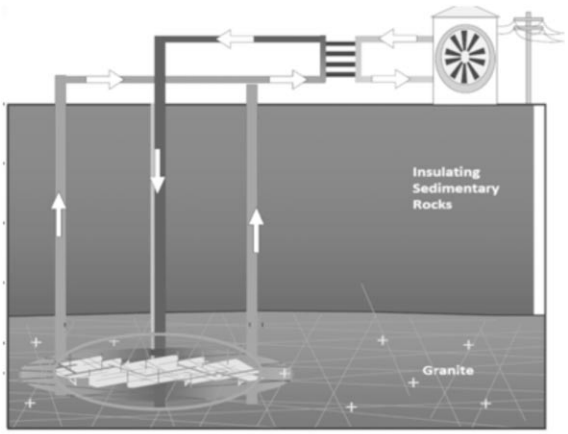
지열발전에서의 인공저류층생성 기술

김 광 염
한국건설기술연구원 수석연구원

1. 서 론

EGS 지열발전은 심부의 고온암층에 인공저류층을 형성하여 지열유체의 원활한 흐름을 위한 투수성을 증가시키는 것이 핵심기술이다(**그림 1**). 즉, 심부의 암반내에 존재하는 균열의 상태에 관계없이 시추작업 만으로는 경제성 있는 지열저류층 확보가 불가능하다.

심부의 대상암반에 경제성을 확보할 수 있는 지열저류층을 생성시킴으로써 생산성을 증가시키기 위해서는 자극(stimulation)이 필요하다. 자극이라 함은 인위적인 힘을 가하여 지열저류층의 투수율을 증가시키기 위해 균열네트워크 생성을 의미한다. 일반적으로 자극기술은 영향범위를 기준으로 분류된다. 수십 미터 이내의 영향범위를 지열정 주변에 형성시키는 방법은 화학적 방법(chemical treatment)과 열적파쇄법(thermal fracturing)이 있다. 열적파쇄법은 주입정 또는 생산정 주변의 시추작업에 의해 저하된 투수율(시추커팅 및 머드 유입 등에 의한)을 복구시키거나, 자연 파쇄대의 수리연결성을 개선시키는 경우에 사용된다. 화학적 처리방법은 주로 지열정의 사용기간이 증가함에 따라 내부에 쌓이는 광물 스케일링(mineral scaling)을 제거하기 위해 사용되며, 저류층의 균열 네트워크 형성을 증진시키기 위해서도 사용된다. 지열정으로부터 수백미터 이상까지 투수율을 개선시키는 유일한 방법은 수압파쇄법(hydraulic fracturing)이다.



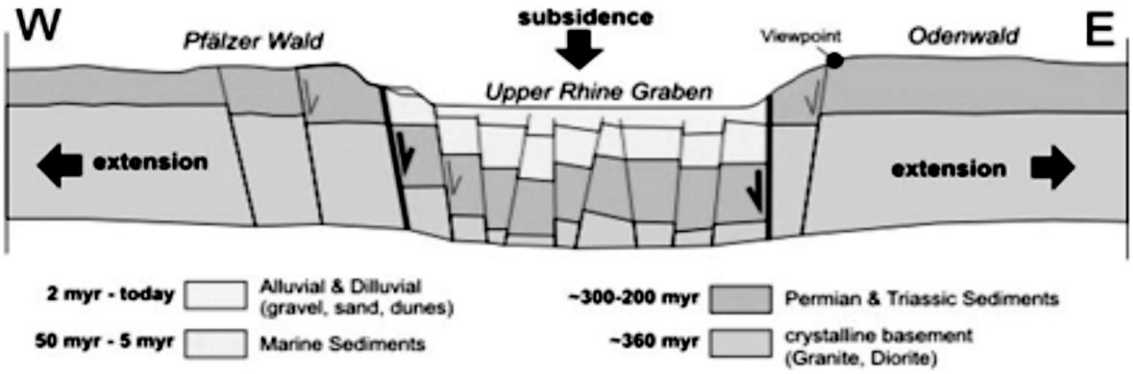
[그림 1] 인공저류층형성에 의한 지열발전 모식도

본 고에서는 자극을 통한 인공저류층생성 기술의 종류와 특징 및 적용시 고려사항 에 대해서 살펴보고자 한다.

2. 지질조건과 인공저류층 형성 방법

2.1. 지질조건

EGS 지열발전은 부지의 지질학적 조건에 따라



[그림 2] 성공적인 지열발전 저류층 형성을 위한 지질사례 : Upper Rhine (Ggeocaching, 2012)

다양하게 공학적으로 계획되어 질 수 있다. 아이슬란드와 같이 화산지대인 경우, 이탈리아의 라데렐로와 같이 변성암 기반인 경우, 프랑스 슐츠 및 독일 란다우, 인스하임 처럼 화성암 기원이면서 심부에 화강암이 존재하는 경우, 또한 퇴적암 기반인 경우 등 다양한 지열발전 사례등이 각기 다른 지질조건에서 수행되어 왔다. 이러한 지질조건들은 그 지역의 온도 특성, 저류층의 불명확성(complexity)정도, 응력장의 영향과 중요도, 구조적 특성, 암석의 변화 정도, 자연 파쇄대의 형성 및 범위, 공극률과 투수율 분포 등을 결정하게 된다. 또한, 이러한 조건들이 적절한 인공저류층 형성을 위한 자극 방법을 결정하게 된다.

성공적인 EGS 지열발전 사례인 프랑스 슐츠, 독일의 란다우와 인스하임 지열발전소는 그림 2와 같이 Upper Rhine Graben 라 불리는 지질구조의 지역에 건설되었다. 남-북 방향의 압축힘에 의해 동-서방향의 지각이 늘어나면서 중앙에 정단층 사이로 블럭 형태로 지층이 침하되는 형태이다. 이렇게 침하된 상부에 퇴적층이 쌓이면서 자연스럽게 열손실을 최소화 할 수 있는 구조가 되었다. 즉, 지열발전을 위한 저류층의 투수율이 상대적으로 높기 때문에 추가적인 인공저류층 형성을 위한 자극 과정이 용이하게 이루어질 수 있는 조건이다.

2.2 지질조건과 목적에 따른 자극 방법 선

일반적으로 지열정이 자극되어야 하는 3가지의 이유가 있다. 첫번째로 대상 지층이 시추작업 동안 손상내지는 막힘(clogging)현상이 발생하기 때문이다. 막힘현상은 심지어는 계획적으로 시추중 공벽을 보호하기 위하여 중량이 높은 물질을 첨가함으로써 발생되기도 한다. 이러한 경우에는 산(acid) 자극방법을 사용함으로써 공내를 청소해야 할 경우도 있다. 또한, 지층내 존재하는 자연파쇄대는 시추중 커팅물질에 의해 역학적으로 닫힘이 발생할 수 있다. 이러한 현상은 대상 암반의 역학적 물성치와 사용된 비트 특성에 따라 발생정도가 결정된다. 열적 자극 방법은 이러한 닫힘현상을 복구하는 데 효율적으로 사용될 수 있다.

두번째로, 지열정을 인공적으로 자극하는 가장 중요한 목적은 지열유체의 유량을 경제성을 고려한 수준까지 끌어올림으로써 생산성을 높이기 위함이다. 이러한 자극은 지열정을 기존 저류층내 균열망에 연결시키거나, 균열망내의 기존에 존재하던 자연균열을 확장시킴으로써 새로운 균열이나 파쇄대를 형성시키는 역할을 하게 된다. 화산지대나 변성암지대와 같이 고온의 저류층이 부존하는 경우에는 열적 자극이 비용적인 측면에서 가장 효율적인 방법이 된다. 일반적으로 저류층의

온도가 210도 이상 인 경우에 열적 자극이 효과적인 것으로 보고되고 있다(Huenges et al., 2010). 기타 화강암이나 퇴적암 기반의 지열저류층에서는 수리자극 방법이 가장 효과적이며, 산 자극법이 추가되기도 한다.

세번째로, 실제로 지열발전 운영중에 광물 침전물이나 부식에 의한 막힘이나 손상이 지열정 내에 발생할 경우에는 산 자극방법이 활용될 수 있다.

2.3 자극과 지열정 방향 설계

최소의 비용으로 최대의 지열을 추출해 내기 위한 최적 지열정 설계를 위해서는 몇가지 방법이 있다. 가장 간단한 방법은 단일 생산정을 구성하는 것이다. 생산에 따른 유량 부족분이 지하수에 의해 충분히 공급되어야만 지속적인 운영이 가능하다. 즉, 지하수 공급이 충분치 않게 된다면 저류층은 더 이상 생산성이 없어지게 된다. 기본적인 지속가능한 설계 모델은 더블렛(doublet) 또는 3개의 트리플렛(triplet)을 구성하는 것이다. 더블렛 모델은 한 개의 주입정, 한 개의 생산정으로 구성되며, 트리플렛은 주입정 하나에 생산정 두개를 배치하는 시스템이다. 또는 멀티웰(multi well)로 확장되어질 수 있다(Armstead and Tester, 1987). 최적의 지열정 개수 결정을 위해서는 목표심도, 각 공당 시추비용, 저류층 암의 초기 생산성, 생산성 증가를 위한 자극 비용 등을 고려하여야 한다.

더블렛 지열정 설계시, 2개의 상충되는 목표를 만족시켜야 한다. 즉, 두공 사이에서 저류층에서의 압력저하가 크지 않도록 이격거리가 크지 않아야 하며, 동시에 두 공 사이에 '짧은 유체이동거리(short circuit)'로 인해 생산정에서의 온도가 저류층 암반온도와 큰 차이가 발생하는 것도 피해야 한다. 일반적으로 이러한 문제를 동시에 해결하기 위해서 다음의 두가지 선택방법이 있다.

- 더블렛 방향이 최대 주응력 방향과 같은 경우 (두공을 연결한 수평면을 따라 인공 균열면 형성)
- 더블렛 방향이 최소 주응력 방향과 같은 경우 (두공을 연결한 면과 수직방향으로 인공 균열면 형성)

두 방법 모두 주입정에서의 압력 증가와 생산정에서의 압력 감소를 유발하게 된다. 짧은 유체이동거리 문제는 최대 주응력 방향으로 지열정을 배치했을 때 발생할 가능성이 높다.

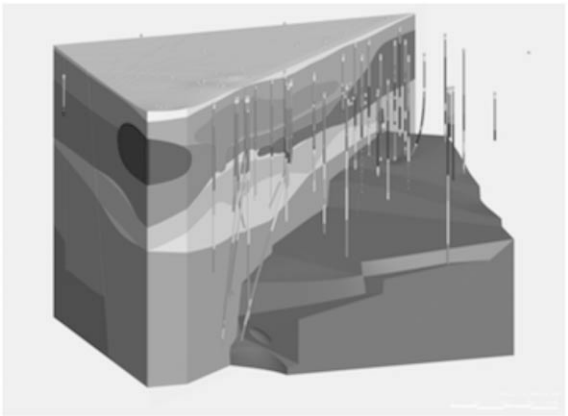
또 다른 방법은 저류층에 존재하는 투수성 단층대와의 연결 하는 것으로서, 하나의 지열정은 자극에 의해 단층대와 연결시키고 또하나의 지열정은 직접 단층대를 관통하도록 하는 방법이다. 이러한 방법을 사용한 대표적인 지열발전이 프랑스 슐츠에서 수행되었다.

2.4 자극 전 조사

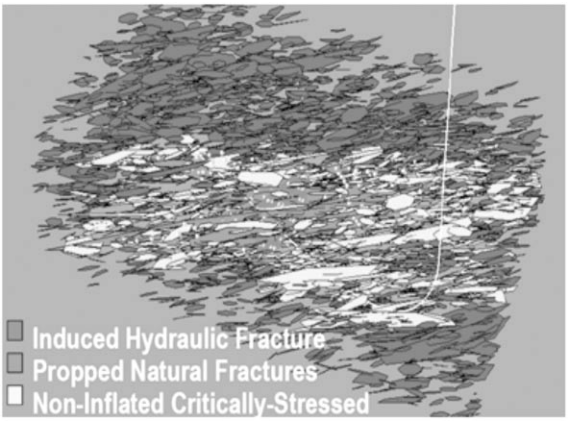
EGS 발전 프로젝트에서 최적의 자극 방법은 자극을 하는 구체적인 목적, 대상 지역의 지질학적 및 부존 열조건에 따라 결정된다. 주어진 지질 조건하에서 결정된 최적의 자극 방법은 탐사의 종류와 심도 등을 결정한다. 자극을 하기전에 수행하는 사전 조사의 중요한 목적은 기하학적인 균열망 설계에 대한 결정을 위한 토대를 제공하고 자극전 수행되어지는 잠정적인 균열 전파 모델링을 위한 핵심 인자를 제공한다.

필요한 조사 내용에 대한 차이는 존재하지만, 개별 자극에 대한 결정은 지하 암반에 대한 모델에 기초하게 된다. 즉, 2D 또는 3D 탄성파 데이터를 통한 상세하고 구조적이고 층서학적인 해석은 주요 지질구조와 특성, 응력장에 대한 정성적인 정보, 주요 층서구조 및 암석에 대한 정보 등을 제공한다(**그림 3**).

수리 자극을 실시하는 경우, 국부적인 응력장에 대한 상세 평가가 EGS 저류층에 대한 전체 응력텐서를 이상적으로 결정하기 위한 목적으로 수행



[그림 3] 지구물리탐사를 통한 지반 모델링(GNS, 2012)



[그림 4] 저류층 균열 모델링 사례 (Dershowitz & Doe, 2010)

되어진다. 이외에도 수리 자극에 의한 암반의 파괴형태와 관련된 경험적인 모델을 개발하고EGS 저류층의 암질에 대한 이해를 위해서 시추커팅과 코어에 대한 광물학적 암석학적 특성화 작업이 반드시 수행되어야 한다. 이러한 과정은 화학적 자극이 수행되는 경우에 특히 중요하다.

가장 일반적인 코어 분석은 공극률, 투수계수와 같은 암석의 특성이다. 또한, 추가적으로 열물성과 파괴역학적 인자(파괴인성) 등이 분석되어 질 수 있다.

수리자극 방법을 계획할 때에는 반드시 균열 모델링의 과정이 필수적이다. 이러한 모델을 위해 필요한 물성치들은 탄성계수, 포와송비, 내부마찰각, 공탄성계수 등이며, 이 중에서도 압력, 균열형상, 균열 폭등과 직접적으로 관련이 있는 탄성계수가 가장 중요하다. 따라서 수리자극 전 암석 코어를 통한 삼축시험등을 실시해 이러한 탄성 물성에 대한 정보를 사전에 확보하는 것이 매우 중요하다(**그림 4**).

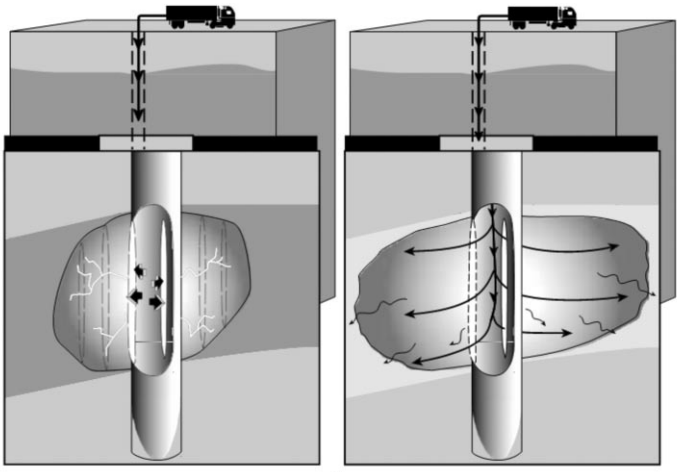
3. 수리자극

3.1 수리자극이란

1980년대 초반부터 많은 지역에서의 연구를 통해 인장 균열보다는 전단 균열이 보다 압도적인 우세한 것으로 나타났다(Pine and Batchelor, 1984; Baria et al., 1999). 자연상태의 절리들은 주로 주응력 방향을 따라 형성되어 있으며 전단으로 파괴가 발생한다. 따라서, 높은 응력 이방성 및 이에 따른 높은 전단응력을 가진 지층은 수리자극을 위한 가장 최적의 후보가 된다. 응력에 대한 정보는 수압파쇄 과정을 이해하고 더 나아가서 예측하는데 매우 중요하다. 보어홀 깨짐(borehole breakout), 보어홀 균열, 미소지진, 수리자극 압력은 주응력 성분의 방향과 크기를 규명하기 위해 분석되어지게 된다.

쇼트서킷을 방지하기 위해서 수리자극시 공내에 여러개의 분리된 패커를 설치하고 순차적인 수리자극을 수행하는 방법을 사용할 수 있다. 이러한 방법은 과도한 미소지진의 발생을 억제하는 효과도 있다.

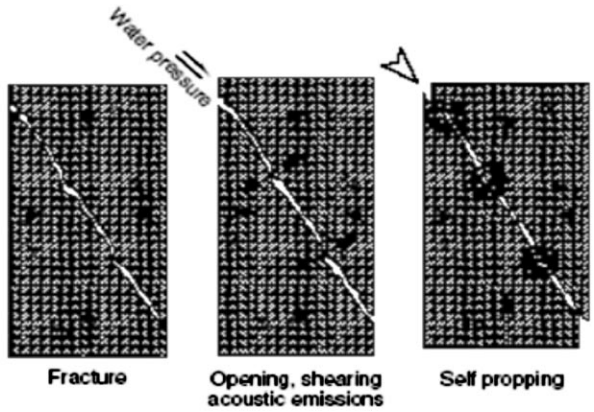
지열정의 수리자극에 의해 유도된 미소지진 사례가 보고되고 있으나, 모든 암반이 이러한 미소지진을 발생시키지는 않는다. 지표에서 느껴지는 유도 지진은 대부분 경암에서 발생하는 것으로 보고되고 있다. 경암에서는 수리자극시 작용한 수압이 균열 및 균열망을 통해서만 전해지기 때문에 모두 소멸되지 않고 암반을 통해 전달이 용이하다. 하지만 다공질 퇴적암에서는 균열 이외에도



[그림 5] 자극에 의한 인공저류층 생성 메커니즘 : 압력에 의한 공벽 파괴(좌), 균열전파(우) (Economides & Nolte, 2011)

공극을 통해 압력이 확산되면서 압력의 소멸이 쉽게 발생할 수 있다. 상부에 충분한 퇴적암층이 있는 경우에는 이러한 유도지진을 크게 감소시키는 역할을 할 수 있다.

수리자극 및 순환시에 저류층의 확장을 제어하는 것은 매우 중요하다. 미소지진 측정시스템은 파쇄대의 부피를 측정할 수 있는 미소지진 발생 위치와 크기의 정보를 측정하기 위해 지열정 주변에 설치한다. 최근의 EGS 프로젝트에서는 이러한 미소지진 계측 정보를 이용하여 새로운 지열정을 위치를 결정하기 위해서 사용하고 있다(프랑스 슐츠, 호주 쿠퍼베이신).



[그림 6] 물에 의한 자극후 균열이 스스로 유로를 형성하는 메커니즘 (Huenges et al., 2010)

3.2 물에 의한 수리자극법

물에 의한 수리자극법은 투수계수가 매우 낮거나 불투수성인 암반에 많은 양의 물을 사용하여 길고 가는 균열을 형성시킬때 사용한다. 일반적으로 이 방법은 약 1 mm 의 간극과 수백m 길이 범위를 가지는 균열을 생성시킨다(**그림 5**). 이 방법은 암반 자체의 프로핑(propping) 능력과 전단 변위 가능성에 의해 성공여부가 결정된다(**그림 6**).

물 수리자극 중의 유량은 일정할 수도 있고 증감이 반복될 수도 있다. 유량이 일정하게 유지되는 것보다는 지속시간이 짧더라도 높은 유량이 주기적으로 가해지는 것이 균열이 제대로 역할을 하는데 더 유리하다는 것이 여러 시뮬레이션을 통해 알려져 있다.

수리자극을 보다 강화하기 위해서는 모래나 프로판트 같은 마모성 재료를 높은 유량이 발생하는 동안 유체에 첨가하는 방법이 있다. 이러한 방법은 생성된 균열의 수리전도도를 증가시키는 역할을 하고, 프로판트가 균열을 통해 움직일때 잘 분산될 수 있도록 도와주는 분산제를 사용함으로써 에칭된 균열폭의 높이를 증가시키고 프로판트가 균열의 끝까지 잘 이동할 수 있도록 해준다. 주입된 유체와 화학적으로 결합된 겔 사이에 산도(pH)가 다를 경우에는 마찰감소제를 사용할 수도 있다.

3.3 겔-프로판트 방법

겔-프로판트 방법은 특정크기의 프로판트와 같이 이용하게 되는데, 겔을 포함하고 있는 저류층을 수리자극하는데 사용된다. 이 방

법은 투수계수가 다른 다양한 지층에 적용될 수 있다. 이 방법에 의해 생성된 균열은 약 50 ~ 100 m 의 짧은 길이를 갖게 된다. 하지만 균열의 간극이 10 mm에 이른다. 즉, 앞서 언급한 물 자극과 비교했을때 길이는 짧지만 간극은 큰 균열이 생성되게 된다. 이 방법은 특히 지열정 표면(공벽)을 높은 투수 환경으로 변경시키기 위해 주로 사용된다. 일반적으로 물 자극법에 비해서 비용이 많이 든다.

3.4 하이브리드 방법

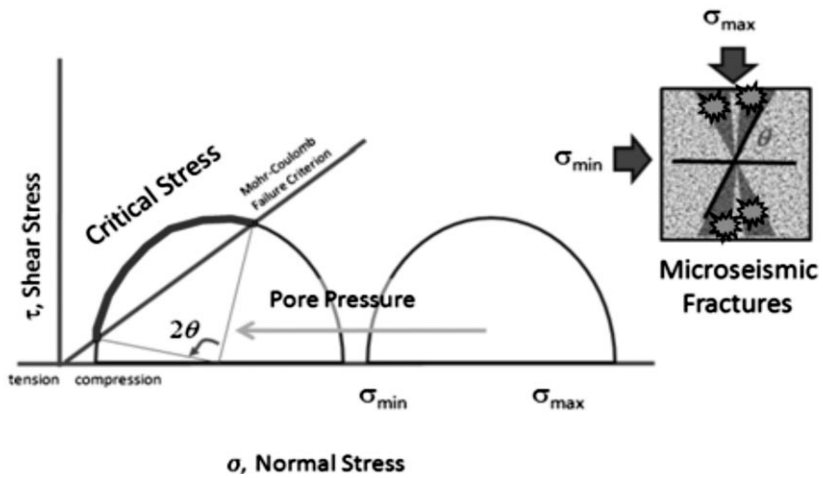
하이브리드 시스템은 연수(slickwater)를 주입하여 균열을 발생시킨다. 그리고 나서 결합겔이 포함된 겔패드를 주입하며, 결합겔과 특정 사이즈의 프로판트나 모래를 균열내부에 주입한다. 이 방법은 투수율이 낮은 저류층에 적용될 수 있으며, 지속적인 생산율을 확보하기 위해 사용된다.

4. 유도지진 (Induced seismicity)

앞서도 언급하였듯이 인공저류층의 생성을 위한 수리자극 과정에서 발생할 수도 있는 유도지진은 수리자극을 다루는데 있어서 매우 중요하게 고려하여야 할 요소이다. 일반적으로 유도지진은 “자연적이 아닌 인간의 행위에 의해서 발생한 지진”을 의미한다. 유도지진은 석유와 가스 생산, 대규모 저수댐, 깊은 심도에서의 채굴, 지열 분야에서 관찰되어져 왔다. 지열 프로젝트와 관련하여 유도지진은 수리자극 단계 또는 운영단계에서 유체의 주입 및 회수과정에서 발생될 수 있다.

EGS 방식의 지열발전에서 발생하는 유도지진을 설명하기 위한 몇가지의 원인들은 다음과 같다.

- 유효응력의 감소 : 공극수압의 증가에 따라 잠재적인 전단면(균열 또는 단층 등)에서의 유효응력의 감소. 편차응력이 존재하는 경우 이러한 마찰력의 감소는 탄성파를 유발하는 이동을 야기할 수 있음(**그림 7**)
- 응력 재분배 : 지열유체의 주입과 회수는 저류층안의 부파 변화를 야기함. 이러한 부피 변화는 대규모의 응력 재분배를 야기하고, 저류층 부근의 균열 및 단층에서의 전단거동을 야기함
- 열탄성 변형률 : 차가운 유체의 주입에 의한 온도의 강하는 균열 표면의 수축을 야기하며, 유효응력의 감소와 마찬가지로, 마찰력을 감소시킴으로 규열면을 따른 거동을 야기함
- 균열면의 화학적 변화 : 저류층으로 지열유체의 주입은 유체와 접촉하는 균열면의 지화학적인 변화를 야기할 수 있으며 이를 통해 표면의 마찰계수가 감소할 수 있음



[그림 7] 미소지진을 야기하는 균열 생성 메커니즘: 수리자극에 따른 공극수압 증가와 파괴조건(Dershowitz & Doe, 2010)

이상은 유도지진의 발생원인에 대한 정성적인 메커

니즘이다. 수리자극과 이에 따른 유도지진과의 관계성은 분명하지만 아직까지 정량화 할 수 있는 구체적인 관계는 밝혀지지 못하고 있는 실정이다. 이러한 관계에는 유량, 압력, 주입량, 응력장, 저류층 암반의 역학적 특성, 유도지진의 규모와 횟수 등이 고려되어질 것이다(Haring, 2007).

5. 결 론

현재 국내에서 아시아 최초로 건설되고 있는 EGS 방식의 지열발전소 건설을 통해 국내에서도 지열발전의 상용화를 위한 기술적, 사회적, 환경적, 정책적 해결 과제들을 구체화 할 수 있는 좋은 기회의 장이 마련되었다. 다른 에너지원에 비해 지열발전 만이 가지고 있는 장점도 분명하지만, 아직까지 초기비용측면, 기술성공의 리스크가 크다는 것도 분명한 사실이다. 그럼에도 불구하고 이러한 리스크를 충분한 연구와 경험을 통해 극복 가능하다는 것이 외국사례를 통해 검증되었으며, 점진적인 연구개발 및 투자를 통해 반드시 확보해야할 미래에너지원으로서의 중요성은 분명하다. 지열발전 상용화를 위해 완성도를 높여야 할 기술분야 중 인공저류층형성은 가장 핵심이 되는 부분이다. 포항 지열발전소 건설현장에서도 인공저류층형성 작업이 진행될 것이며, 이 과정에서 획득되는 많은 데이터는 인공저류층형성 메커니즘 및 이에 수반되는 유도지진 등 다양한 현상에 대한 정량적 규명과정에 중요한 정보로 활용되어야 한다. 지열발전의 상용화를 위해 기술적, 경제적 난제들을 부정적인 시각으로 보기 보다는 학계 및 산업계, 정부 모두 힘을 모아 해결책을 제시할 수 있는 방안을 마련하는 것이 우리나라의 에너지 정책에 부합하는 길이라고 판단된다.

6. 참고문헌

1. Dershowitz, W., Doe, T., 2010, Discrete fracture network models of natural and hydraulic fractures, Proceedings of AIPG Marcellus Shale Hydraulic Fracturing Conference.
2. Economides, M.J., Nolte, K.G., 2011, Reservoir Stimulation 3rd Ed., Wiley, 639p.
3. Geocaching, 2012, Retrieved Nov. 25, 2012, from http://www.geocaching.com.
4. GNS, 2012, Retrieved Nov. 25, 2012, from http://www.gns.cri.nz.
5. Huenges et al., 2010, Geothermal Energy System, Wiley-VCH, 463p.