

유발지진 관측과 활용

강태섭^{1*} · 이준기² · 최남수³

¹부경대학교 지구환경과학과

²서울대학교 지구환경과학부

³한국광해관리공단 광해기술연구소

Induced Seismicity and Its Applications

Tae-Seob Kang^{1*}, Junkee Rhie², and Nam-Soo Choi³

¹Department of Earth and Environmental Sciences, Pukyong National University

²School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University

³Institute of Mine Reclamation Technology, Mine Reclamation Corporation

요약: 유발지진은 인류에 의한 수많은 영향 및 다양한 지질학적 조건과 연관되어서 지난 수십 년 동안 관측되어 왔다. 이 논문에서는 다양한 유발지진을 고찰하고 자연적인 조구조 지진뿐만 아니라 유발지진의 종류에 따라 서로 비교한다. 수압파쇄는 암석층에서 새로운 균열을 통해 투수성을 높이는데 보편적으로 사용된다. 이 과정에서 유발지진이 발생하는데, 이 지진은 단열망과 석유/가스의 이동에 관한 중요한 정보를 제공한다. 유사한 방식으로 탄화수소 생산과정이나, 댐 저수지, 채광 활동 또는 폐수 주입 등의 과정에서도 의도하지 않은 유발지진이 발생하며, 이를 이용하여 다양한 수리역학적 과정과 다양한 규모에서 저류층 특성의 변화를 파악할 수 있다. 일반적인 결론으로 지금까지 알려진 유발지진에 대한 불확실성과 지식의 한계를 요약하고 향후 연구에서 다루어야 할 몇 가지 주제를 제시한다.

주요어: 유발지진, 인간 활동, 수압파쇄, 수리역학적 과정, 저류층 특성, 탄화수소

Abstract: Induced seismicity has been observed in the relation with lots of anthropogenic influence and at variety of geological conditions over the last several decades. This paper reviews those induced earthquakes and compares with each other as well as with natural tectonic earthquakes. Hydraulic fracturing is commonly used to enhance the permeability through new cracks in the rock formation. The process triggers the induced seismicity, which can give crucial information on the fracture network and oil/gas migration. In the similar way, unintentionally induced events during the production procedure of the field, dam reservoir, mining activity, or wastewater injection can be used to give insight into various hydrodynamic processes and changes of reservoir properties at a various scales. The general conclusion summarizes the uncertainty or limitations of knowledge up to date and presents some issues to be dealt with in the future research.

Keywords: Induced seismicity, human activities, hydraulic fracturing, hydrodynamic processes, reservoir properties, hydrocarbon

서론

지진의 대부분은 조구조 응력의 작용이나 화산활동 등과 같이 자연적인 원인으로 발생한다. 반면 일부 지진은 인간의 활

동과 관련되어 있으며, 이런 지진을 유발지진(induced earthquake)이라고 부른다. 유발지진의 원인으로 분류할 수 있는 인간 활동에는 댐과 같은 대규모 물 저장시설 축조, 광산 개발, 탄화수소나 지열 및 지하수와 같은 유체의 강제 주입 및 배출 등이 있다. 여기에는 유발지진을 의도한 경우와 그렇지 않은 경우가 혼재되어 있으며, 다양한 지질학적 조건에 따라 그 양상이 다르다. 인간 활동이 지진을 일으킬 수 있다는 생각은 적어도 1870년대 까지 거슬러 올라간다. 당시 미국 공병단은 미국 남부 캘리포니아의 닫힌 바다인 Salton 해에 거대한 담수 저장소를 만들고자 하는 제안을 지진 유발 가능성을 이유로 들어 거절하였다.

실제로 그런 염려는 현실이 되어, 1935년 미국 네바다와 아리조나 경계에 후버댐을 건설하고 물을 채운 후인 1936년부터

Received: 17 November 2014; Final version Received: 11 February 2015;

Accepted: 16 February 2015

*Corresponding author

E-mail: tskang@pknu.ac.kr

Address: Department of Earth and Environmental Sciences, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

©2015, Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

이 지역의 지진활동이 뚜렷하게 증가한 것이다(Bolt, 2006). 그 이후로 많은 유발지진 사례가 보고되었으며, 가능한 한 초기의 문헌을 통하여 확인할 수 있는 각 유발지진 원인별 사례에는 지하 핵실험(Boucher *et al.*, 1969), 댐 저수(Gupta *et al.*, 1972), 채광 굴착(Cook, 1976), 유체 주입 처분(Tabelli and Cornet, 1987), 석유와 가스 생산(Grasso, 1992), 석유 회수 증진(Maxwell *et al.*, 1998), 지열 생산(Baria *et al.*, 1999), 생산정 자극(Phillips *et al.*, 2002), 이산화탄소 지중저장(Maxwell *et al.*, 2004) 등이 있다.

지진활동을 일으키는 물리적인 조건은 크게 지각 내부에 작용하는 응력의 변화와 단층면의 점착력 저하로 양분할 수 있다. 대부분의 자연지진은 수 킬로미터 이상의 깊이에서 발생하기 때문에 진원에서의 응력상태나 단층 강도를 알아내는 것은 거의 불가능하다. 한편, 지각에서 수평응력에 인위적인 영향을 주는 것은 매우 어렵지만, 수직응력의 경우에는 상부의 하중을 증가시키거나 감소시킴으로써 상대적으로 변화를 일으키기 쉽다. 예를 들어 대규모 댐에서 수십억 톤의 물을 가두거나 방출하는 경우, 또는 대규모 지표 광산에서 채굴 등을 통하여 국지적으로 지각에 가하는 하중에 변화를 줄 수 있다. 인위적으로 지진을 일으킬 수 있는 가장 일반적인 방법은 지하 유체의 공극압력을 증가시켜서 기존 단층에 파괴가 일어나는 응력 수준을 낮추는 것이다(Scholz, 2002; McGarr *et al.*, 2002). 이와 같은 물리적 조건의 변화로 잠겨있는 상태에 머물러 있었을 수도 있는 주변 단층의 재활성이 야기될 수 있지만, 그 인과관계를 증명하는 것 또한 쉬운 일이 아니며 많은 논란이 존재한다(Kerr and Stone, 2009).

지하 핵실험이나 댐 저수 등이 야기할 예기치 않은 유발지진과 달리, 비교적 최근에는 이러한 유체의 주입을 통한 암석의 수압파쇄 과정에서 발생하는 유발지진을 활용하는 사례가 점점 늘어나고 있는 추세이다(Turcotte *et al.*, 2014). 유발지진을 가장 능동적으로 활용하는 분야 가운데 하나가 석유나 가스와 같은 탄화수소 개발 관련 산업이다(Maxwell, 2011; Davies *et al.*, 2013). 이 분야에서는 유발지진을 주로 개발 및 생산단계에서 지하에서 발생하는 다양한 상황을 감시하기 위한 수단으로 사용하고 있다. 또한 심부지열발전을 통하여 에너지를 확보하기 위한 산업도 이와 유사하다(Majer *et al.*, 2007; Grünthal, 2014). 인위적인 열수 단열망을 얻기 위하여 지하 심부에 가해지는 압력으로 인하여 암석에 균열이 발생하는 과정에서 지진이 발생한다. 이러한 유발지진은 보통 규모와 진도가 작아서 부지 주변에 이들을 감지할 목적으로 설치한 미소지진 관측망에서나 관측할 수 있는 것이 일반적이지만, 때때로 광역 지진관측망에서 관측이 되거나 사람이 느낄 수 있을 정도로 큰 지진을 일으킬 수 있는 잠재적인 요인이 되기도 한다(Giardini, 2009; Ellsworth, 2013; Keranen *et al.*, 2014). 이러한 석유와 가스, 채광 및 지열 개발과 댐 저수 등에서 발생할 수 있는 유발지진에 관한 여러 문제점들과 책임에 대한 체계

적인 고민은 대체로 1990년대 말부터 이루어지기 시작한 것으로 보인다(Cypser and Davis, 1998).

어떠한 원인에 의하여 유도되는 이차적인 지진활동을 다루기 위하여 사용되는 용어로 유발지진(induced earthquake)과 격발지진(triggered earthquake)이 있다. 이 두 유형을 구분하는 어떤 기준을 세우고 실제 지진활동에서 분류를 시도하는 것은 매우 어렵다. 이 논문에서는 다음과 같이 지진원을 구분하여 간단하게 의미상의 차이를 둘 것이다. 인위적인 활동으로 새롭게 형성되는 암석의 균열과 연관된 지진을 유발지진으로 정의하며, 이 활동으로 다른 주변에 존재하는 기존 단층 또는 균열이 재활성하여 발생하는 지진을 격발지진으로 구분하고자 한다.

지금까지 유발지진으로 분류할 수 있는 미소지진 활동은 다양한 환경에서 비교적 큰 문제없이 다루어져 왔다. 그러나 이러한 비교적 안정적인 상황이 실제 유발지진에 관한 과학적인 이해와 기술적인 활용이 완성되어서라기보다는, 오히려 반대로 자연지진 발생 메커니즘과 다른 유발지진의 특성 및 대규모 지진 격발 가능성에 대하여 정확한 이해가 많이 부족하기 때문으로 보는 것이 타당하다. 그 이유는 대부분의 유발지진의 규모가 매우 작아서 기존 자연지진 관측에 사용되는 지진계로는 이들을 관측하는 것 자체가 어렵고 또한 관측 자료의 주파수 범위 또한 이들 미소 규모 유발지진의 정확한 진원 속성을 파악하는데 한계가 있기 때문이다. 보다 근본적인 문제는 다양한 유발지진 발생 현상에서의 지진관측 자료의 접근이 대부분 매우 제한적이어서, 지진학자들이 유발지진의 정확한 실체를 파악할 수 있는 기회 자체가 마련되기 어려운 상황에 기인한다. 이 논문에서는 다양한 환경에서 유발된 지진활동에 대하여 지금까지 알려진 내용을 고찰하고 유발지진을 일으키는 메커니즘을 완전하게 이해하는데 문제가 되는 사항들을 도출하고자 한다. 더 나아가서 유발지진을 활용하는 다양한 분야를 살펴보고 관련된 핵심기술에 대하여 토의한다. 마지막으로 이러한 유발지진 활용 분야가 직면하고 있는 문제점과 앞으로의 과제를 전망하고자 한다.

유발지진의 유형

댐 저수 유발지진

전 세계적으로 대규모 저수지의 약 2%에서 유발지진이 발생한 것으로 알려져 있다(Gupta and Rastogi, 1976; Simpson *et al.*, 1988). 그러나 많은 지역에서 지진관측망이 잘 갖춰져 있지 않은 것을 감안하고 규모가 작은 경우에는 유발지진 활동이 존재하더라도 감지하기 어려운 상황일 것이기 때문에 정확한 현황을 파악하기가 어렵다. 더욱이 이런 유형의 지진활동으로 보고된 지진규모의 범위는 1.0 이하로부터 8.0에 이르기까지 폭넓기 때문에 단순한 지진발생 메커니즘으로 이러한 지진활동을 일관되게 설명하는 것은 곤란하고, 2008년 중국 쓰

환성지진의 경우에서처럼 댐 저수활동과 유발지진의 인과관계에는 많은 논란이 있다(Klose, 2008; Kerr and Stone, 2009; Chen, 2009; Deng *et al.*, 2010). 지금까지 확인된 가장 큰 규모의 댐 저수 유발지진은 규모 6.3으로 1962년 중국 Hsinfengkian 댐과 1967년 인도 Koyna 댐 인근에서 발생하였다(Bolt and Cloud, 1974; Rastogi and Gupta, 1976). 호주에서는 7개의 가장 깊은 저수지 가운데 5개의 저수지 주변에서 유발지진이 발생하였고, 3개의 가장 큰 저수지에서 모두 유발지진이 발생하였다(Gibson and Sandiford, 2013).

지하수 공극압력은 저수지의 하중으로 인한 압축으로 증가하며, 저수지가 채워짐에 따라 증가하는 공극압력이 일정 수준 이상에 이르게 되면 거의 즉시 지진을 유발할 수 있다. 반면에 어떤 저수지에서는 지진활동 감소가 보고되기도 하는데, 압축 응력 체제에서 공극압력의 증가가 조구조적 압축응력을 이완하는 역할을 하는 것으로 생각할 수 있다(Fig. 1). 이러한 현상은 저수지 하부에서 지하수의 확산으로 인하여 공극압력이 증가하는 또 다른 지진유발 메커니즘으로 설명하기도 하는데, 이 메커니즘으로 10 ~ 20 km에 이르는 자연지진 발생 깊이에서도 유발지진이 발생할 수 있다는 것을 설명하기도 한다(Gupta, 2002). 이와 같은 메커니즘으로 유발된 지진은 지하수의 낮은 투과성으로 인하여 저수지가 채워진 이후에 수년 동안 시기가 지연되어 발생하기도 한다. 대규모 저수지로 인하여 지하수 공극압력이 영향을 받는 지각의 범위는 수천에서 수만 km³에 이르는 반면, 규모 5.0 내지 6.0의 지진과 관련된 진원 구역은 수십에서 수백 km³에 불과하다. 이러한 대조적인 영향 범위는 공극압력의 변화가 저수지 인근에 분포하는 기존 단층의 재활동을 유도하는 것을 암시하며, 이 때문에 대규모 저수지 건설에 따른 지진재해도는 다소간의 예측 가능성을 가진다(Woodward-Clyde Consultants, 1977; Sharma, 1995; Jackson, 2012).

규모에 따른 지진활동의 상대적인 빈도를 나타내는

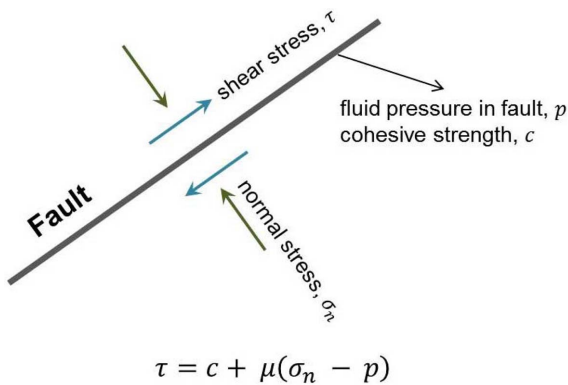


Fig. 1. Role of fluid pressure in earthquake generation. The effective stress law indicated below explains the relationship between the shear stress τ , the cohesive strength c , the friction coefficient μ , the normal stress σ_n , and the fluid pressure p in the fault (Hubbert and Rubey, 1959).

Gutenberg-Richter 관계식의 b 값을 비교하면, 댐 저수활동과 관계된 유발지진은 대개 같은 지역에서 자연지진에 의한 배경 지진과 비슷하다. 유발지진은 보통 수 ~ 수십 개의 지진이 군집을 이루는 경우가 많다. 대부분의 경우에 댐 저수로 인한 유발지진 활동 정도는 약 20년이 지나면 줄어들어서 저수 이전의 수준을 회복하는 것이 일반적이다. 총 저수용량과 최대 수심 모두 저수지 유발지진 활동의 존재와 일정한 상관관계를 갖는 것처럼 보이지만, 지역에 따라 그 양상이 다르고 지진관측망 분포에 많은 차이가 있기 때문에 아직까지 일반화된 관계식을 얻기에는 자료가 많이 부족한 실정이다.

채광 유발지진

단단한 암반에서 이루어지는 대규모 노천 채굴 광산은 하부의 수직방향 주응력을 완화시켜서 역단층 환경의 지진을 유발하는 경향이 있다. 지하 암반 채광으로 인한 유발지진은 채광으로 인한 응력장의 변화에 의하여 주로 발생한다. 이러한 지진은 보통 광산에서 발파에 의하여 영향을 받으며, 많은 지진들이 대규모 발파 이후 수초에서 수분 이내에 발생한다. 채광으로 인한 많은 소규모 변화가 무수히 많은 매우 작은 미소지진을 일으킨다. 규모 -3.0에서 0.0 사이의 지진이 가장 보편적이며, 어떤 광산에서는 규모 2.0까지의 지진도 자주 발생하고, 때로는 규모 4.0 또는 그 이상의 지진이 유발되기도 한다(Li *et al.*, 2007).

대규모 노천 채굴 석탄광산은 비교적 고화 정도가 약한 퇴적층에 위치하기 때문에 큰 변형에너지를 축적하기가 어렵다. 이런 지역에서 일어나는 변형은 주로 채굴 이후 수개월에서 수년에 걸쳐 연약한 지표 퇴적층 내에서 느리게 진행되는 대규모 운동으로 인한 것이며, 갑작스런 에너지 방출이 이루어지지 않기 때문에 지진을 유발하기가 어렵다. 한편, 지하 석탄광산에서는 유발지진과 유사한 특성을 갖는 암반 붕락이나 광산 붕괴 등이 발생할 수 있다. 하지만 방출되는 에너지는 조구조적인 변형에너지가 아닌 중력에 의한 위치에너지가 대부분이다.

채광으로 인한 유발지진의 규모가 아무리 커도 그 진원구역의 크기는 채광으로 인하여 직접적인 영향을 받는 전체 암반 체적에 비하여 작다. 이는 채광 유발지진의 최대규모가 채광으로 인하여 영향을 받는 체적 범위 이내로 제한을 받는다는 것을 의미한다. 일반적으로 채광 유발지진 활동의 깊이는 안정한 대륙지각에서의 지진활동 깊이 분포에 비하여 얕으며, 이러한 깊이에서는 변형에너지 밀도가 낮아서 큰 단층을 파열할 수 있을 정도의 정상적인 조건을 갖춘 위치에 있지 않다(Sholz, 2002). 큰 단층은 보통 파열을 유지할 수 있을 정도로 충분한 변형에너지가 축적되는 깊이에서 상대적으로 약한 지점으로부터 파열을 시작한다. 이와는 달리, 특정한 광산에서 가장 큰 채광 유발지진의 크기는 채굴 암반의 체적뿐만 아니라 채굴의 시간 및 공간적인 범위에도 관계된다(Mendecki, 2011).

유체 주입 유발지진

작은 지진을 일으킬 수 있는 가장 쉬운 방법 가운데 하나는 상당한 응력을 받고 있는 암석에 유체나 가스를 주입하는 것이다. 지각 내부로 유체를 주입하는 인위적인 활동은 거의 탄화수소 추출을 증진하고, 수압파쇄를 통하여 공극을 확대하거나, 유체 폐기물 및 이산화탄소 등을 장기간 격리 저장할 목적으로 이루어지고 있다.

수압파쇄는 균열이 열릴 정도로 충분히 높은 압력으로 지층에 유체를 주입하는 과정을 포함한다(Majer, 2006; Shapiro and Dinske, 2009). 주입 지점에서 보통 최소주응력을 초과하는 유체 압력을 가하여 최소주응력에 수직인 방향으로 단열이 열리도록 한다. 이렇게 수압파쇄는 팽창 특성이 우세하기 때문에 대부분의 자연지진이 갖는 전단 특성과 대조적이다. 그래서 전단운동이 우세한 자연지진에 일반적인 이중쌍힘 지진원 메커니즘(double-couple source mechanism) 이외에도 수압파쇄는 전형적으로 비이중쌍힘 지진원 메커니즘(non-double couple source mechanism)을 포함한다(Šílený *et al.*, 2009). 하지만 수압파쇄를 위하여 주입한 유체가 기존 단층으로 스며들 수 있으며, 드문 경우에는 이중 쌍힘 메커니즘 성분을 가지고 자연지진과 유사하게 전단운동 지진을 유발하기도 한다(Šílený *et al.*, 2009).

유발지진과 관련된 폐수 주입 사례에서 확인할 수 있는 유량(flow rate) 자체는 보통 작은 편이다. 미국 오클라호마 Prague 인근에서 2011년 11월 규모(Mw) 5.7의 지진을 포함하여 몇 차례 발생한 연쇄지진과 관련된 폐수 주입율은 대략 월간 1000톤 정도에 불과하였다(Keranen *et al.*, 2013). 그러나 주입이 10여년에 걸쳐 지속적으로 이루어졌고, 주입 총량은 약 200,000톤에 이르렀다. 유체의 총 주입량이 유발지진의 최대규모와 밀접한 상관관계를 갖는다는 것을 보여주는 여러 사례가 있다(Nicol *et al.*, 2011; Dinske and Shapiro, 2013; McGarr, 2014; Verdon, 2014). Fig. 2와 Table 1은 이러한 관계가 비교적 명확하게 문헌에 보고된 사례들을 정리한 것으로, McGarr (2014)와 Verdon (2014)에 제시된 자료를 종합하였다.

유체 주입으로 유발된 지진활동은 비교적 잘 정의된 제한된 범위의 작은 영역 내에 분포하는 것이 특징적이다. 호주 Cooper Basin의 심부지열발전 부지에서 발생한 유발지진이 이에 대한 좋은 예이다(Hunt and Morelli, 2006). 이 지역에서는 약 3 km³ 보다 작은 지하 공간범위 내에서 수천 여개의 소규모 유발지진이 발생하였다. 이 정도 공간범위에 상응하는 단층 파열을 가정해보면 대략 규모 4.0 정도의 지진에 이른다. 한편으로 이 범위 내에서 어떤 큰 지진을 야기할 정도로 충분히 큰 단층 위의 가장 약한 지점이 위치할 가능성은 매우 희박하며, 우리가 아는 한 이러한 사례가 보고된 바도 없다. 하지만, 유체 주입으로 영향을 받는 체적 범위를 벗어나는 거리에서 기

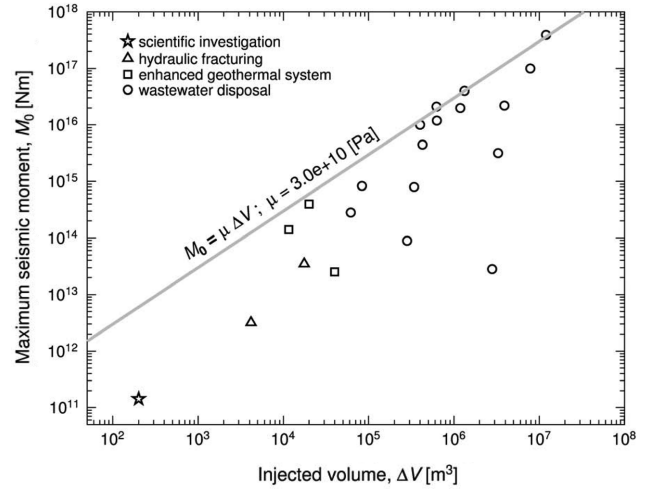


Fig. 2. Maximum seismic moment of induced earthquakes in relation to fluid injection volume (modified from McGarr (2014) with the inclusion of Verdon (2014)). The grey line indicate the envelope for the maximum seismic moment as described by McGarr (2014), which relates the maximum seismic moment to the product of the modulus of rigidity and the total injection volume of fluid.

존 단층이 파괴될 수 있는 가능성은 충분하다. 일반적인 폐수 재주입 깊이가 규모 4.0 ~ 6.0 정도의 지진을 일으킬 수 있는 단층의 일부에 걸쳐있을 수도 있다(Keranen *et al.*, 2013).

연쇄적인 유발지진 활동 형태를 분석함으로써 새로운 작은 단열의 형성과 기존 지질 단층의 재활동이라는 지진의 기원에 대한 두 가지 형식에 대하여 생각해볼 수 있다. 수압파쇄 과정에서 지진활동도와 b값은 일정하지 않으며, 적어도 미소지진 규모에서 유체 주입율과 관련이 있는 것처럼 보인다. 이렇게 일관되지 않은 지진활동 특성은 수압파쇄 과정이 지속적으로 새로운 단열을 형성한다는 것을 암시한다. 반면에 주입이 시작된 이후 일정한 시간이 지나서 지진규모가 증가하는 형태는 이미 형성된 단층이 재활동하는 상황으로 설명하는 것이 더 적절하다.

유체 고갈 유발지진

침하는 유체나 가스의 추출 및 이로 인한 공극압력의 감소로 인하여 발생하며 탄화수소 생산 지역에서 주로 발생한다. 이러한 지하 물질의 추출 과정에서 국지적인 응력 변화가 일어날 수 있고, 그와 관련된 상당한 지진활동이 발생할 수 있다. 그러나 일반적으로 유체의 고갈은 기존 단층에 유효 수직 응력을 증가시켜서 전단파괴를 억제하여야 한다. 이러한 역학적인 조건에도 불구하고, 유체 고갈로 인한 중소규모의 지진이 발생하였다. 대표적으로 프랑스의 Lacq 가스전에서 발생한 최대규모 4.2를 포함하여 수천 개의 지진활동이 관측된 사례를 들 수 있다(National Research Council, 2012).

Table 1. Maximum seismic moments and total injection volume of fluid.

Event	Location	Injection period	Max. seismic moment, M_0 (max) [Nm]	Max. magnitude, M_{max}	Injection volume, ΔV [m ³]	Injection rate [m ³ /month]	Type	Reference(s)
KTB	Eastern Bavaria, Germany	indefinite	1.43E+11	1.4	2.00E+02	indefinite	scientific	Zoback and Harjes [1997]
BUK	Bowland shale, UK	indefinite	3.20E+12	2.3	4.17E+03	indefinite	hydraulic fracturing	De Pater and Baisch [2011]
GAR	Garvin County, Oklahoma, USA	indefinite	3.50E+13	3.0	1.75E+04	indefinite	hydraulic fracturing	Holland [2013]
STZ	Soultz, France	indefinite	2.51E+13	2.9	3.98E+04	indefinite	enhanced geothermal system	Majer <i>et al.</i> [2007]; Baisch <i>et al.</i> [2006]
DFW	Dallas-Fort Worth Airport, Texas, USA	2008–2009	8.90E+13	3.3	2.82E+05	52,000	wastewater disposal	Frohlich <i>et al.</i> [2011]
BAS	Basel, Switzerland	indefinite	1.41E+14	3.4	1.15E+04	indefinite	enhanced geothermal system	Majer <i>et al.</i> [2007]; Baisch <i>et al.</i> [2006]
ASH1	Ashtabula, Ohio, USA; Jul. 1987	indefinite	2.82E+14	3.6	6.17E+04	indefinite	wastewater disposal	Seeber <i>et al.</i> [2004]; Nicholson and Wesson [1990]
CBN	Cooper Basin, Australia	indefinite	3.98E+14	3.7	2.00E+04	indefinite	enhanced geothermal system	Majer <i>et al.</i> [2007]; Baisch <i>et al.</i> [2006]
ASH2	Ashtabula, Ohio, USA; Jan. 2001	1987–1994	8.00E+14	4.3	3.40E+05	5,000	wastewater disposal	Seeber <i>et al.</i> [2004]; Nicholson and Wesson [1990]
YOH	Youngstown, Ohio, USA	2010–2011	8.30E+14	4.0	8.34E+04	10,000	wastewater disposal	Ohio Department of Natural Resources [2012]; Kim [2013]
PBN	Paradox Valley, Colorado, USA	1991–present	3.16E+15	4.3	3.29E+06	60,000	wastewater disposal	Ake <i>et al.</i> [2005]
RAT1	Raton Basin, Colorado, USA; Sep. 2001	indefinite	4.50E+15	4.4	4.26E+05	indefinite	wastewater disposal	Meremonte <i>et al.</i> [2002]
GAK	Guy, Arizona, USA	2010–2011	1.20E+16	4.7	6.29E+05	95,000	wastewater disposal	Horton [2012]
POH	Painesville, Ohio, USA	indefinite	2.00E+16	4.8	1.19E+06	indefinite	wastewater disposal	Nicholson <i>et al.</i> [1988]
RMA	Denver, Colorado, USA	1961–1968	2.10E+16	5.3	6.25E+05	34,000	wastewater disposal	Major and Simon [1968]; Herrmann <i>et al.</i> [1981]; Hsieh and Bredehoeft [1981]
TTX	Timpson, Texas, USA	2006–2013	2.21E+16	4.8	3.90E+06	45,000	wastewater disposal	Frohlich <i>et al.</i> [2014]
RAT2	Raton Basin, Colorado, USA; Aug. 2011	indefinite	1.00E+17	5.3	7.84E+06	indefinite	wastewater disposal	Rubinstein <i>et al.</i> [2014]
POK	Prague, Oklahoma, USA	1993–2011	3.92E+17	5.7	1.20E+07	1,400	wastewater disposal	Keranen <i>et al.</i> [2013]
PER	Perry, Ohio, USA	1975–1986	3.98E+16	5.0	1.33E+06	11,000	wastewater disposal	Nicholson <i>et al.</i> [1988]; Ahmad and Smith [1988]
TRI	Trinidad, Colorado/New Mexico, USA	1988–present	1.00E+16	4.6	4.00E+05	30,000	wastewater disposal	Shirley [2001]; Meremonte <i>et al.</i> [2002]
CLE	Cleburne, Texas, USA	2005–2010	2.82E+13	2.9	2.80E+06	54,000	wastewater disposal	Justinic <i>et al.</i> [2013]

탄화수소 개발 지역 유발지진

셰일가스 개발이나 생산정 자극을 위하여 유체를 주입함으로써 유발지진을 일으켜서 능동적으로 활용하는 경우이며, 앞에서 다룬 폐기물 유체 주입에 따른 원하지 않는 유발지진 활동과는 구별하여야 한다. 장기적인 탄화수소 개발로 인하여 다양한 방식으로 석유와 가스 저류층 주변의 역학적 조건들이 변할 수 있다. 이러한 변화는 저류층과 주변 암석에 상당한 응력 변화를 일으킬 수 있다. 주입된 유체는 균열 속으로 침투하여 공극과 단열의 유체 압력을 증가시켜서 균열대의 순환제 역할을 할 수 있다. 단층을 따른 암반의 운동과 관련된 인공지진 및 조구조 지진뿐만 아니라 유체의 침투로 인한 유발지진을 촉발시키는 힘을 세 가지로 분류할 수 있다. 첫째, 공극탄성력(poroelastic force)은 주변 암석에서 단층을 따라 변위를

일으킬 수 있다. 둘째, 정수압력(hydrostatic force)은 주입대에서의 공극압력을 단층이나 다른 투수특성이 있는 균열을 통해서 지진이 발생할 수 있는 지역으로 전달할 수 있다. 이 경우에는 유체 이동 자체를 무시할 수도 있다. 셋째, 압력 차이는 주입대에서 지진이 시작하는 곳으로 유체가 이동하는 원인이 된다.

유전 개발은 항상 저류층의 응력상태를 아주 조금이라도 변화하게 한다. 때로는 이러한 변화가 기존의 작은 배경지진 활동 수준을 증가시키기도 한다. 이때 방출되는 지진에너지는 저류층과 주변 암석들의 불균질한 정도와 이들이 퇴적된 속도와 같은 특성들에 따라 달라진다. 주변 지역의 지진활동에 상당한 변화를 가져온 저류층 생산 지역에 관한 다양한 사례들이 알려져 있으며, 이들 유전지대에서 얻은 자료를 전 세계 다른 지

역의 측정 자료와 비교한 결과는 저류층과 주변 암석의 특성이 유발지진에 가장 밀접하게 연관되어 있음을 보여준다 (Adushkin *et al.*, 2000). 평균 저류층 깊이와 두께 또한 유발지진과 관련이 있는 것처럼 보인다. 대부분의 경우 유발지진 사례가 보고된 유전의 저류층 깊이와 두께는 그렇지 않은 다른 유전지역의 경우보다 더 크다. 또한 유발지진이 있는 유전에서 평균 공극률과 투수율은 그렇지 않은 유전에 비하여 더 낮은 경향이 있다.

저류층 개발과 관련된 많은 유발지진 사례가 있고, 이러한 지진활동을 생산과정에서 발생할 수 있는 재해의 하나로 인식하는 것이 타당하지만, 실제 사람들이 느낄 수 있을 정도로 강한 지진이 발생한 사례는 그렇게 많지 않다. 거의 대부분의 유발지진은 규모가 아주 작아서 아주 민감한 지진계를 통해서만 기록이 가능한 정도이다. 자연적인 변형과정에서 생긴 지진뿐만 아니라 유발지진과 같이 규모가 매우 작은 미소지진은 암석에서 지진학적으로 활성인 단층과 연약대의 위치에 관한 중요한 정보를 포함한다. 또한 응력상태의 시간적인 변화와 층에 관한 다른 특성들에 관한 정보를 수반한다. 생산과 관련된 유발지진 기록을 해석하여 활성단층을 규명하고, 가스-석유-물의 유체 경계를 확인하며, 저류층의 투수성 및 공극률의 시간에 따른 변화를 추정할 수 있다. 반대로 이러한 정보를 이용하여 탄화수소 생산, 물 주입, 생산증진 등의 계획을 최적화할 수 있다.

유발지진의 특성

유발지진은 외부 자극으로 급조된 상태에서 발생하기 때문에 정상적인 지진과는 다르다. 상당수의 미소지진을 제외하면, 유체 주입으로 인한 지진 에너지는 결국 언젠가는 방출될 정상적인 조구조 변형에너지이다. 유발지진에서 역단층과 주향이동단층 및 정단층과 같은 단층 유형은 같은 위치에서 발생 가능한 정상적인 지진과 다르지 않다. 정상적인 조구조 지진과 마찬가지로, 유발지진의 규모는 단층에 대한 응력 수준에 따라 다르다. 응력이 단층의 긴 분절에 걸쳐서 높을수록 규모가 커지게 된다. 유발지진의 규모-빈도 분포 역시 자연지진 활동과 마찬가지로 지수 법칙 또는 로그-선형 관계로 표현되는 Gutenberg-Richter 관계식의 형식으로 표현할 수 있다.

유발지진은 보통 얇은 깊이에서 발생하기 때문에, 정상적인 천부 균발지진과 유사하게 규모 1.0 ~ 4.0 사이의 최대규모를 가지고 거의 대부분 소규모 지진으로 발생하는 경향이 있다. 한 가지 예외적인 상황은 대규모 댐 저수지 하부에서 발생하는 유발지진의 경우이다. 이 경우에 증가된 지하수 공극압력이 천부 유체 주입의 경우보다 훨씬 더 깊은 곳까지 훨씬 더 큰 체적에 영향을 미친다. 그 결과로 규모 6.0이 넘는 유발지진이 발생하기도 한다. 유발지진이 자주 발생하는 지역은 일반적으로 자연지진 활동이 이전에 자주 발생한 지역과 같다. 이러한

사실은 어떤 부지에 대한 최악의 경우가 어떤 인위적인 원인에 의하여 촉발되지 않고 언젠가는 발생할 수 있는 최대지진 추정 규모와 동등하다는 것을 시사한다. 한편 인위적인 활동이 이러한 최대지진의 발생 시기를 앞당길 수도 있다는 것은 분명해 보인다. 지진 발생 빈도가 매우 낮은 것으로 알려진 미국 중동부의 오클라호마 지역에서 최근 급격한 지진활동 증가와 최대 5.7에 이르는 규모의 지진 발생은 이러한 추정이 결코 과장된 것이 아님을 뒷받침한다 (Keranen *et al.*, 2013, 2014; McGarr *et al.*, 2015). 유체 주입으로 인한 비교적 큰 규모 지진의 대부분은 깊이가 약 3 ~ 5 km에서 발생하는데, 이 깊이에서의 암석은 풍화나 단열의 발달이 적기 때문에 비교적 높은 변형에너지 밀도를 가질 수 있다.

대규모 저수지 지역에서 발생하는 유발지진은 지하수가 서서히 더 깊은 곳으로 침투함에 따라 공극압력이 서서히 증가하기 때문에 저수지 채워진 이후 수년에 걸쳐서 지연되어 발생할 수 있다. 이렇게 시작한 지진활동은 보통 10 ~ 30년까지 오랜 기간 동안 지속하는데, 새로운 평형에 도달해서야 비로소 정상 수준의 지진활동으로 되돌아온다. 유체 주입으로 인한 유발지진은 응력 변화에 더 민감하여 주입을 시작한 직후부터 발생하기 시작하여 주입이 끝난 뒤 며칠에서 몇 주 이내에 활동을 멈춘다. 그러나 폐수를 재주입하는 행위가 대규모로 이루어질 경우, 유발지진과 관련된 재해는 수년 동안에 이르기까지 지속할 것이다.

미소지진 관측과 분석

유발지진 감시

유발지진 감시는 일반적인 자연지진 감시를 위하여 설치하는 지진관측망보다 훨씬 더 작은 규모의 크기와 더 높은 분해능을 갖는 것이 보통이다. 지진관측망 설치에 소요되는 상대적인 비용은 관측망 규모가 증가함에 따라 급격하게 감소하는데, 심부 시추공의 경우는 매우 비싸고 천부시추공 및 지표 관측망은 상대적으로 저렴하다. 반면에 지진계 설치 깊이가 얇아질수록 신호 대 잡음비가 낮아져서 획득한 지진기록으로부터 규모가 작은 유발지진 신호를 확인하기가 더 어려워지는 단점이 있다. 또한 유발지진 감시는 지진의 크기와 위치 및 우세한 파열 메커니즘에 따라서 더욱 세분화될 수 있다. 유발지진 감시를 위하여 설치해야 하는 지진관측망에 소요되는 비용이 막대하기 때문에, 높은 성능을 발휘할 수 있는 지진관측망을 설계하고 설치하는 것이 간단한 일은 아니다. 실제 미국에서 수압파쇄 현장의 단 3%만이 미소지진 감시를 위한 지진관측망을 운영하고 있다 (Zoback *et al.*, 2010).

수압파쇄 단계 미소지진 감시

수압파쇄 단계에서 발생하는 미소지진의 규모는 0.0에서 -2.0 이하의 범위를 갖는다. 지진발생 위치는 보통 미터 단위

의 정확도를 가지고 결정한다. 이러한 감시 성능 목표를 달성하기 위해서는 부지 주변 지하 심부에 시추공 지진계 또는 가속도계를 3차원 분포를 갖도록 설치하여야 한다. 보통 초당 2,000에서 20,000 샘플에 이르는 매우 높은 샘플율을 가지고 기록하여야 한다. 이와 같은 샘플율로 연속적인 기록을 유지하면 막대한 양의 자료가 쌓이게 되므로, 대부분의 시스템은 수초에서 1분 이상의 지속적인 기록을 저장할 수 있는 버퍼를 이용하는 트리거(trigger) 방식의 기록을 사용한다. 지진기록은 중앙시스템에서 유지되는데, 수십 마이크로초($\mu s = 10^{-6}$ seconds)의 정밀도로 시간이 매우 정확해야 하며 모든 기록계서 시각 동기화가 유지되어야 한다. 지진계의 수는 관측에 요구되는 정확도에 따라서 다르지만, 수압파쇄 단계에서의 미소지진 관측망은 보통 8에서 20개 정도의 지진계로 이루어진다(Maxwell, 2014).

수압파쇄와 관련된 더 큰 지진의 감시

이러한 지진의 규모 범위는 0.0에서 2.0 이상으로 보통 10 m 이하의 정확도로 위치를 결정한다. 이 정도의 정확도는 부지에서 고밀도 지표형 지진계 또는 가속도계 관측망을 이용하여 달성할 수 있는데, 만일 시추공 지진계로부터 관측한 자료를 함께 사용할 경우에는 정확도를 더욱 향상시킬 수 있다. 미소지진과 마찬가지로 높은 샘플율을 가지고 기록하는 것이 필요한데, 보통 초당 500에서 2000 샘플이 사용되며 시각 정확도는 100 μs 이내여야 한다. 시각의 정확성을 확보하기 위하여 중앙 기록방식이나 GPS (Global Positioning System)를 채용하는 독립적인 기록계를 사용할 수 있다. 이들 지진은 가압된 단열 생성으로 인하여 일차적으로 생성된 것으로부터 자연적인 응력장에 관계된 것까지 비교적 넓은 범위의 발생 메커니즘을 갖는다. 수압파쇄는 대개 이러한 종류의 파열을 목표로 한다(Maxwell, 2014).

이차적인 유발지진 감시

이들 지진은 대부분 수압파쇄를 위한 주입단계에서 가압되는 암석 지점으로부터 어느 정도 떨어진 거리에서 발생하며, 주입 이후에 지연시간을 가지고 발생하는 경우가 많다. 특별한 경우에는 기존 단층의 재활동을 유발하여 발생한 지진의 경우도 포함된다. 따라서 이들 지진의 규모는 직접적인 수압파쇄를 통하여 얻고자 하는 파쇄의 규모보다 다소 큰 편으로, 보통 1.0에서 5.0 이상의 규모 범위를 갖는다. 이들 지진은 수백 미터 이내의 정확도를 가지고 위치를 결정하여야 하며, 각 채널에서 적어도 초당 500 샘플로 지진기록을 얻어야 한다. 이 정도의 기록을 위해서는 직경 10 ~ 40 km 정도의 범위에서 지표형 지진계 또는 가속도계 관측망을 이용할 수 있다. 샘플율은 보통 초당 500에서 2000 샘플 정도가 적당하며, 시각 동기화를 위하여 GPS를 사용하는 개별적인 기록계를 이용하여 연속 또는 트리거 방식으로 기록한다(Maxwell, 2014).

이들 지진 규모가 커짐에 따라서 감시에 필요한 기간도 증가한다. 수압파쇄나 채광 활동의 경우, 유발지진은 보통 파쇄나 발파 또는 채광 이후 수일 이내에 멈춘다. 대규모 댐 저수지의 경우에 유발지진 활동은 저수를 시작한 이후 3년 이상까지 지난 뒤에야 발생하기 시작해서 거의 20년 이상 지속하기도 한다.

유발지진 단층 메커니즘

유발지진의 단층 파열 메커니즘은 일반적인 조구조 활동에 의한 지진과 크게 다를 바가 없는 것으로 알려져 있다. 즉 응력장에 순응하는 방향으로 이미 존재하는 단층에 변위가 발생하는 과정은 크게 다를 바가 없다. 단층 변위가 발생하는 방향에 따라서 역단층, 정단층 및 주향이동단층과 같은 단층의 유형이 결정된다. 이러한 유형의 지진발생 메커니즘을 이중쌍힘 메커니즘(double-couple mechanism)이라고 하는 힘의 작용 체계로 설명할 수 있는데, 이 경우 암석에 발생하는 체적 변화는 무시한다. 수압파쇄와 같은 일부 유발지진의 경우에는 인장 응력장 환경에서 발생할 수 있는 균열 개방과 같은 체적 변화를 포함하기도 한다. 이와 같은 비이중쌍힘(non-double-couple) 운동은 수압파쇄로 인하여 발생하는 변위 양상과 유사하다. 그러나 인장 응력장 환경에서의 균열 개방은 공극압력의 증가와는 달리 인장력의 증가에 따른 것으로 근본적인 메커니즘의 차이를 감안하여야 한다.

수압파쇄 과정에서 발생하는 지진의 유형을 크게 세 가지로 구분할 수 있다. 첫째는 관정 케이싱의 천공 과정에서 발생하는 지진이다. 둘째는 전단운동과 관계되는 이중쌍힘 메커니즘, 개방이나 폐쇄운동과 관계되는 체적 변화 메커니즘 또는 이 두 메커니즘이 결합된 양상으로 저류층 암석의 균열 유발 과정에서 발생하는 지진이다. 셋째는 기존 단층의 재활성으로 인하여 더 큰 지진을 격발(triggered earthquake)하는 경우인데, 이러한 지진은 이중쌍힘 메커니즘을 갖는 것이 보통이다. 미소지진은 주로 첫째 및 둘째 유형과 관련된 지진활동이 우세하다. 그러나 자연적으로 존재하는 균열 역시 매우 넓은 범위의 크기로 존재하기 때문에, 셋째 유형과 같은 격발지진 규모 역시 수압파쇄 과정에서 유발된 균열과 관련된 미소지진 활동의 규모 범위와 겹칠 수 있다. 따라서 단순히 미소지진 활동의 규모와 발생 메커니즘을 비교하여서는 유발지진과 기존 단층 재활성에 따른 격발지진을 구별하기 어려운 점이 있다.

결론: 불확실성과 도전

댐 저수나 채광과 유체 추출 및 수압파쇄 등으로 인한 유발지진의 경우에는 풍부한 사례가 있고, 이 지진들의 규모나 공간적인 분포와 깊이 범위 등에 대한 꽤 많은 정보를 파악하고 있다. 그러나 여전히 대부분의 채광 또는 탄화수소 생산 등과 같이 이해관계가 작용하는 많은 경우에 자료의 공개가 매우

제한적이기 때문에, 일반적인 자연지진 자료와는 다르게 지진 학자들에게도 자료에 대한 접근이 쉽지 않은 상황이다. 또한 이산화탄소 지층 저장과 폐수의 격리 저장 등과 같이 지하수 공극압력이 증가하여 지진을 유발하는 대규모 유체 주입의 경우에는, 이러한 인위적인 행위들에 포함되어 있는 지진 유발 과정에 대하여 우리가 이해할 수 있을 정도로 충분한 자료를 제공할 만한 사례 자체가 매우 적다.

다양한 자연 및 인공적인 조건에서 발생하는 유발지진들을 비교하기 위해서는 작은 지진들은 유발되기 쉽지만 중대규모 지진은 그렇지 않다는 단순한 믿음과 정성적인 설명 이상의 확실성이 보장되어야 한다. 폐수 주입 부지 주변에 대한 최근 연구결과에서 보면 유체의 총 주입량과 최대 지진규모 사이에는 분명한 상관관계가 있다(Dinske and Shapiro, 2013). 반면에 주입 속도와 같은 인자의 역할은 아직까지 불분명하다. 유발지진에 대한 이해가 높아질수록 개발과 관련된 재해의 하나로써 유발지진을 바라보는 관점이 강조될 것이다.

지하 저류층으로 대규모의 장기적인 폐수 주입으로 인하여 주입을 시작한 이후 오랜 시간이 흐른 뒤에 상당한 규모의 지진이 유발될 수 있는 잠재성이 있다는 것이 잘 알려져 있다(Keranen *et al.*, 2013). 이 유발지진에 대한 메커니즘은 대규모 댐 저수 유발지진과 유사하다. 하중이 지속되는 한, 이 하중에 순응하는 단층면을 따라 공극압력이 증가함에 따라서 운동이 유발된다. 이러한 지진으로 조구조 응력이 방출되고, 일단 활동을 한 뒤에는 조구조적인 과정으로 응력이 다시 축적될 때까지는 다시 그런 지진이 발생하기가 쉽지 않다. 그러나 대규모 주입은 이러한 응력 축적을 가속화하기 때문에, 주입을 장기적인 측면에서 지진 잠재성과 함께 이해하려는 노력이 매우 중요하다.

미소지진 감시를 통하여 유발된 단열 파괴의 위치와 이로부터 전체 단열망을 구축할 수 있다. 하지만 수압파쇄가 전단이동 단층 파열을 우세하게 일으키는 지 또는 인장 개방과 같은 파열이 우세한지에 대한 논란 또한 여전하다(Taleghani and Lorenzo, 2011). 초기의 연구는 기존 단열에서 발생하는 전단 파괴가 전형적인 유발지진 메커니즘인 것으로 결론지었다. 이에 대한 해석은 유체의 삼투작용으로 유효 수직응력이 감소하여 전단응력이 해소되도록 한다는 것이었다. 최근의 많은 연구는 수압파쇄에 수직인 방향으로 일어나는 인장 개방이 가장 우세한 미소지진 신호에 대한 메커니즘이라는 점을 지지하고 있다. 이러한 문제를 이해하기 위해서는 지각에서의 응력 상태와 유체 이동 및 단열망의 진화 등에 대한 더 많은 질문에 대한 해답을 먼저 찾아야 한다.

감사의 글

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다

(No. 20132510100060).

References

- Adushkin, V. V., Rodionov, V. N., Turuntaev, S., and Yudin, A. E., 2000, Seismicity in the oil field, *Oilfield Review*, Summer 2000, 2-17.
- Ahmad, M. U., and Smith, J. A., 1988, Earthquakes, injection wells, and the Perry Nuclear Power Plant, Cleveland, *Ohio Geology*, **16**, 739-42.
- Ake, J., Mahrer, K., O'Connell, D., and Block, L., 2005, Deep injection and closely monitored induced seismicity at Paradox Valley, Colorado, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **95**, 664-683.
- Baisch, S., Weidler, R., Voros, R., Wyborn, D., and de Graaf, L., 2006, Induced seismicity during the stimulation of a geothermal HFR reservoir in the Cooper Basin, Australia, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **96**, 2242-2256.
- Baria, R., Baumgärtner, J., Rummel, F., Pine, R. J., and Sato, Y., 1999, HDR/HWR reservoirs: concepts, understanding and creation, *Geothermics*, **28**, 533-552.
- Bolt, B. A., 2006, *Earthquakes*, 5th Ed., W. H. Freeman and Company.
- Bolt, B. A., and Cloud, W. K., 1974, Recorded strong motion on the Hsinfengkiang Dam, China, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **64**(4), 1337-1342.
- Boucher, G., Ryall, A., and Jones, A. E., 1969, Earthquakes associated with underground nuclear explosions, *Journal of Geophysical Research*, **74**(15), 3808-3820.
- Chen, Y., 2009, Did the reservoir impoundment trigger the Wenchuan earthquake? *Science China (D)*, **52**, 431-433.
- Cook, N. G. W., 1976, Seismicity associated with mining, *Engineering Geology*, **10**, 99-122.
- Cypher, D. A., and Davis, S. D., 1998, Induced seismicity and the potential for liability under U.S. law, *Tectonophysics*, **289**, 239-255.
- Davies, R., Foulger, G., Bindley, A., and Styles, P., 2013, Induced seismicity and hydraulic fracturing for the recovery of hydrocarbons, *Marine and Petroleum Geology*, **45**, 171-185.
- De Pater, C. J., and Baisch, S., 2011, *Geomechanical study of Bowland Shale seismicity*, Cuadrilla Resources Ltd., 57p.
- Deng, K., Zhou, S., Wang, R., Robinson, R., Zhao, C., and Cheng, W., 2010, Evidence that the 2008 Mw 7.9 Wenchuan earthquake could not have been induced by the Zipingpu reservoir, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **100**(5B), 2805-2814.
- Dinske, C., and Shapiro, S. A., 2013, Seismotectonic state of reservoirs inferred from magnitude distributions of fluid-induced seismicity, *Journal of Seismology*, **17**(1), 13-25.
- Ellsworth, W. L., 2013, Injection-induced earthquakes, *Science*, **341**, doi:10.1126/science.1225942
- Frohlich, C., Ellsworth, W., Brown, W. A., Brunt, M., Luetgert, J., MacDonald, T., and Walter, S., 2014, The 17 May 2012 M4.8 earthquake near Timpson, East Texas: An event possibly

- triggered by fluid injection, *Journal of Geophysical Research*, **119**, 581-593.
- Frohlich, C., Hayward, C., Stump, B., and Potter, E., 2011, The Dallas-Fort Worth earthquake sequence: October 2008 through May 2009, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **101**, 327-340.
- Giardini, D., 2009, Geothermal quake risks must be faced, *Nature*, **462**, 848-849.
- Gibson, G., and Sandiford, M., 2013, *Seismicity and induced earthquakes*, Office of the New South Wales Chief Scientist and Engineer.
- Grasso, J. R., 1992, Mechanics of seismic instabilities induced by the recovery of hydrocarbon, *Pure and Applied Geophysics*, **139**, 507-534.
- Grünthal, G., 2014, Induced seismicity related to geothermal projects versus natural tectonic earthquakes and other types of induced seismic events in Central Europe, *Geothermics*, **52**, 22-35.
- Gupta, H. K., 2002, A review of recent studies of triggered earthquakes by artificial water reservoirs with special emphasis on earthquakes in Koyna, India, *Earth-Science Reviews*, **58**, 279-310.
- Gupta, H. K., and Rastogi, B. K., 1976, *Dams and Earthquakes*, Elsevier, 229p.
- Gupta, H. K., Rastogi, B. K., and Narain, H., 1972, Common features of the reservoir associated seismic activities, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **62**, 481-492.
- Herrmann, R. B., Park, S.-K., and Wang, C.-Y., 1981, The Denver earthquakes of 1967-1968, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **71**, 731-745.
- Holland, A., 2013, Earthquakes triggered by hydraulic fracturing in south-central Oklahoma, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **103**, 1784-1792.
- Horton, S., 2012, Disposal of hydrofracking waste fluid by injection into subsurface aquifers triggers earthquake swarm in central Arkansas with potential for damaging earthquake, *Seismological Research Letters*, **83**, 250-260.
- Hsieh, P. A., and Bredehoeft, J. D., 1981, A reservoir analysis of the Denver earthquakes: A case of induced seismicity, *Journal of Geophysical Research*, **86**, 903-920.
- Hubbert, M. K., and Rubey, W. W., 1959, Role of fluid pressure in mechanics of overthrust faulting: 1. Mechanics of fluid-filled porous solids and its application to overthrust faulting, *Geological Society of America Bulletin*, **70**, 115-166.
- Hunt, S. P., and Morelli, C., 2006, *Cooper Basin HDR hazard evaluation: Predictive modeling of local stress changes due to HFR geothermal energy operations in South Australia*, University of Adelaide.
- Jackson, J., 2012, *Earthquake Hazards and Large Dams in Western China*, A Probe International Study, 26p.
- Justinic, A. H., Stump, B., Hayward, C., and Frohlich, C., 2013, Analysis of the Cleburne, Texas, earthquake sequence from June 2009 to June 2010, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **103**, 1-11.
- Keranen, K. M., Savage, H. M., Abers, G. A., and Cochran, E. S., 2013, Potentially induced earthquakes in Oklahoma, USA: Links between wastewater injection and the 2011 Mw 5.7 earthquake sequence, *Geology*, **41**(6), 699-702, doi:10.1130/G34045.1.
- Keranen, K. M., Weingarten, M., Abers, G. A., Bekins, B. A., and Ge, S., 2014, Sharp increase in central Oklahoma seismicity since 2008 induced by massive wastewater injection, *Science*, **345**, 448-451, doi:10.1126/science.1255802.
- Kerr, R. A., and Stone, R., 2009, A human trigger for the great quake of Sichuan?, *Science*, **323**, 322, doi:10.1126/science.323.5912.322.
- Kim, W.-Y., 2013, Induced seismicity associated with fluid injection into a deep well in Youngstown, Ohio, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **118**(7), 3506-3518.
- Klose, C. D., 2008, The 2008 M7.9 Wenchuan earthquake - Result of local and abnormal mass imbalances?, *Eos Trans. AGU* 89, no. 53, Fall Meet. Suppl., Abstract U21C-08.
- Li, T., Cai, M. F., and Cai, M., 2007, A review of mining-induced seismicity in China, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **44**(8), 1149-1171.
- Majer, E., Baria, R., Stark, M., Oates, S., Bommer, J., Smith, B., and Asanuma, H., 2007, Induced seismicity associated with Enhanced Geothermal Systems, *Geothermics*, **36**, 185-222.
- Majer, E. L., and Peterson, J. E., 2005, Application of micro-earthquake monitoring for evaluating and managing the effects of fluid injection at naturally fractured EGS Sites. *GRC Transactions*, **29**, 103-107.
- Major, M. W., and Simon, R. B., 1968, A seismic study of the Denver (Derby) earthquakes, *Geophysical and Geological Studies of the Relationships Between the Denver Earthquakes and the Rocky Mountain Arsenal Well*, Quarterly of the Colorado School of Mines, v. 63. no. 1.
- Maxwell, S., 2011, Microseismic hydraulic fracture imaging: The path toward optimizing shale gas production, *The Leading Edge*, **30**, 340-346.
- Maxwell, S., 2014, *Microseismic Imaging of Hydraulic Fracturing: Improved Engineering of Unconventional Shale Reservoirs*, 2014 Distinguished Instructor Short Course, Society of Exploration Geophysicists, 2 October 2014, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon, Korea.
- Maxwell, S. C., Young, R. P., Bossu, R., Jupe, A., and Dangerfield, J., 1998, Microseismic logging of the Ekofisk reservoir, *Proceedings of Eurock '98*, Society of Petroleum Engineers/International Society for Rock Mechanics, Paper 47276.
- Maxwell, S. C., White, D. J., and Fabriol, H., 2004, Passive Seismic Imaging of CO₂ Sequestration at Weyburn, *Proceedings of SEG International and 74th Annual Meeting*, Society of Exploration Geophysicists, CPS1.7.
- McGarr, A., 2014, Maximum magnitude earthquakes induced by fluid injection, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **119**, 1008-1019, doi:10.1002/014JB010597.
- McGarr, A., Bekins, B., Burkhardt, N., Dewey, J., Earle, P., Ellsworth, W., Ge, S., Hickman, S., Holland, A., Majer, E., Rubinstein, J., and Sheehan, A., 2015, Coping with earthquakes induced by fluid injection, *Science*, **347**(6224), 830-831.

- McGarr, A., Simpson, D., and Seeber, L., 2002, Case histories of induced and triggered seismicity, in Lee, W. H. K., Kanamori, H., Jennings, P. C., Kisslinger, C., Ed., *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*, Academic Press, 647-661.
- Mendecki, A. J., and Lötter, E. C., 2011. Modelling seismic hazard for mines, *Proceedings of Australian Earthquake Engineering Society 2011 Conference*, 18-20.
- Meremonte, M. E., Lahr, J. C., Frankel, A. D., Dewey, J. W., Crone, A. J., Overturf, D. E., Carver, D. L., and Rice, W. T., 2002, Investigation of an earthquake swarm near Trinidad, Colorado, August-October 2001, US Geological Survey *Open-File Report 02-0073*, 32p.
- National Research Council, 2012, *Induced Seismicity Potential in Energy Technologies*, The National Academies Press.
- Nicholson, C., Roeloffs, E., and Wesson, R. L., 1988, The northeastern Ohio earthquake of 31 January 1986: Was it induced?, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **78**, 188-217.
- Nicholson, C., and Wesson, R. L., 1990, Earthquake Hazard Associated With Deep Well Injection: A Report to the U.S. Environmental Protection Agency, *U.S. Geological Survey Bulletin 1951*, 74p.
- Nicol, A., Carne, R., Gerstenberger, M., and Christophersen, A., 2011, Induced seismicity and its implications for CO₂ storage risk, *Energy Procedia*, **4**, 3699-3706.
- Ohio Department of Natural Resources, 2012, *Preliminary report on the Northstar 1 class II injection well and the seismic events in the Youngstown, Ohio area*, 23p.
- Phillips, W., Rutledge, J., House, L., and Fehler, M., 2002, Induced microearthquake patterns in hydrocarbon and geothermal reservoirs: six case studies, *Pure and Applied Geophysics*, **159**(1), 345-369.
- Rastogi, B. K., and Gupta, H. K., 1976, *Dams and Earthquakes*, Elsevier Scientific Publishing Company.
- Rubinstein, J. L., Ellsworth, W. L., McGarr, A., and Benz, H. M., 2014, The 2001-present induced earthquake sequence in the Raton Basin of northern New Mexico and southern Colorado, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **104**(5), 2162-2181.
- Scholz, C. H., 2002, *The mechanics of earthquakes and faulting*, 2nd Ed., Cambridge University Press.
- Seeber, L., Armbruster, J., and Kim, W.-Y., 2004, A fluid-injection-triggered earthquake sequence in Ashtabula, Ohio: Implications for seismogenesis in stable continental regions, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **94**, 76-87.
- Šílený, J., Hill, D. P., Eisner, L., and Cornet, F. H., 2009, Non-double-couple mechanisms of microearthquakes induced by hydraulic fracturing, *Journal of Geophysical Research*, **114**, B08307.
- Simpson, D. W., Leith, W. S., and Scholz, C. H., 1988, Two types of reservoir-induced seismicity, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **78**, 2025-2040.
- Shapiro, S. A., and Dinske, C., 2009, Fluid-induced seismicity: Pressure diffusion and hydraulic fracturing, *Geophysical Prospecting*, **57**, 301-310.
- Sharma, V. K., 1995, Probable risk estimation due to reservoir induced seismicity at Jamrani Dam project, Kumaon Himalaya, India, *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, **52**, 103-108.
- Shirley, K., 2001, Tremors prompted by industry activity? Colorado quakes cause concern, *AAPG Explorer*, December 2001, http://archives.aapg.org/explorer/2001/12dec/colo_quakes.cfm (October 1, 2014 Accessed).
- Talebi, S., and Cornet, F.-H., 1987, Analysis of the microseismicity induced by a fluid injection in a granitic rock mass, *Geophysical Research Letters*, **14**(3), 227-230.
- Taleghani, A. D., and Lorenzo, J. M., 2011, An alternative interpretation of microseismic events during hydraulic fracturing, *Proceedings of SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference*, 2011.
- Turcotte, D. L., Moores, E. M., and Rundle, J. B., 2014, Super fracking, *Physics Today*, **67**(8), 34-39.
- Verdon, J. P., 2014, Significance for secure CO₂ storage of earthquakes induced by fluid injection, *Environmental Research Letters*, **9**(6), 064022, doi:10.1088/1748-9326/9/6/064022.
- Woodward-Clyde Consultants, 1977, *Earthquake Evaluation Studies of the Auburn Dam Area*, Report to the U.S. Bureau of Reclamation, Contract No. 6/07/DS/72090, Auburn-Folsom South Unit, Central Valley Project, California, 8 vol.
- Zoback, M. D., and Harjes, H.-P., 1997, Injection-induced earthquakes and crustal stress at 9 km depth at the KTB deep drilling site, Germany, *Journal of Geophysical Research*, **102**, 18477-18491.
- Zoback, M., Kitasei, S., and Copithorne, B., 2010, Addressing the environmental risks from shale gas development, Briefing Paper 1, Worldwatch Institute.