

독일 그로스 쉘네베크 EGS 실증 프로젝트 연구사례

민기복, 박세혁*, 권터 째머만

Case Study on Groß Schönebeck EGS Project Research in Germany

Ki-Bok Min, Sehyeok Park*, Günter Zimmermann

Abstract This paper presents a case study of an enhanced geothermal system(EGS) demonstration project conducted in Groß Schönebeck, Northern Germany, focusing on hydraulic stimulation. The project was conducted with doublet system in sandstone and volcanic formations at 4 - 4.4 km depth. Under normal faulting to strike-slip faulting stress regime, hydraulic stimulations were conducted at injection and production wells by massive waterfrac and gel-proppant fracturing. Injectivity index increased from 0.97 m³/(hr*MPa) to 7.5 m³/(hr*MPa) and productivity index increased from 2.4 m³/(hr*MPa) to 10.1 m³/(hr*MPa) by a series of hydraulic stimulations at both wells. After circulation tests through injection and production wells, however, productivity index decreased from 8.9 m³/(hr*MPa) to 0.6 m³/(hr*MPa) in two years. Slip tendency analysis for the stimulation in volcanic layer estimated the required pressure for shear slip and its preferred orientations and it showed reasonable match with actual stimulation results. Through the microseismicity observation for the stimulation of volcanic formation, only 80 seismic events with its moment magnitudes in $-1.8 < M_w < -1.0$ were observed, which are unexpectedly low for EGS hydraulic stimulation.

Key words Groß Schönebeck, Enhanced geothermal system, Hydraulic stimulation, Slip tendency analysis, microseismicity

초 록 본 논문에서는 독일 북부의 그로스 쉘네베크 지역에서 진행된 EGS 실증프로젝트를 수리자극 시험 중심으로 소개한다. 이 지역에서는 사암 및 화산암으로 이루어진 심도 4 - 4.4 km의 지층 내에 각각 1개의 주입정과 생산정을 갖는 순환 시스템을 구성했다. 정단층 및 주향이동단층 응력상태 하에서 물 또는 젤과 균열지체체를 주입하여 주입정과 생산정에서 각각 수리자극이 이루어졌으며, 그 결과 주입지수가 0.97 m³/(hr*MPa)에서 7.5 m³/(hr*MPa)로 증가하였고 생산성지수는 2.4 m³/(hr*MPa)에서 10.1 m³/(hr*MPa)로 4.25배 증가했다. 그러나 주입정과 생산정을 연결하는 순환수리시험에서는 2년간 생산성지수가 8.9 m³/(hr*MPa)에서 0.6 m³/(hr*MPa)까지 감소했다. 화산암층에서의 수리자극에 대해 전단 미끄러짐 해석을 수행한 결과 전단균열의 발생 방향 및 요구되는 유체 압력을 실제 수리자극 결과와 유사하게 예측해 냈다. 화산암층에서의 수리자극 시 미소진동을 관측한 결과 모멘트 규모 -1.8에서 -1.0 범위의 미소진동이 80회 나타나 미소진동의 발생은 극히 미미했다.

핵심어 그로스 쉘네베크, 인공저류층 지열시스템, 수리자극, 전단 미끄러짐 분석, 미소진동

1. 서 론

지열에너지는 이산화탄소를 적게 발생시키고 지구상

어디에나 존재하는 중요한 신재생에너지이다. 특히 지열발전의 경우 기후나 밤낮의 구분 없이 24시간 가동이 가능하여 다른 신재생에너지에 비해 장점을 지닌다. 현재 세계적으로 지열에너지는 지열직접이용의 형태로 70 GWt, 지열발전의 형태로 12.6 GW의 용량이 설치되어 있다(Bertani, 2015, Lund and Boyd, 2015). 한국의 경우 지열직접이용의 형태로 835 MW가 이용되고 있으나 지열발전의 경우 아직 실현된 바 없다(Song and Lee, 2015). 한국과 같이 평균적인 지온경사를 지니는 국가에서는 지하 4-5 km까지 시추하고 인공적으로 암반 투수율을 향상시켜 지열발전을 이루는 EGS(Enhanced

Received: Aug. 12, 2015

Revised: Aug. 26, 2015

Accepted: Aug. 26, 2015

*Corresponding Author: Sehyeok Park

Tel) +822880723, Fax) +8228770925

E-Mail) sehyeok@snu.ac.kr

Department of Energy Systems Engineering, College of Engineering, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul, 151-744, Korea (Republic of)

Geothermal System, 인공저류층 지열 시스템) 지열발전 연구가 세계적으로 활발히 수행되고 있으며 한국에서도 연구개발 및 포항 등지에서의 실증연구가 진행 중이다(Min et al., 2013a, b). 심부시추를 통해 인공저류층을 형성하는 경우, 시추공을 통해 고압의 유체를 주입하여 암반에 균열을 생성하는 수압파쇄(hydrofracturing) 혹은 기존 균열의 틈을 벌리는 수리전단(hydroshearing) 기술을 이용해 투수율을 향상시킨다. 이러한 기술은 개념적으로는 확립되어 있으나 실제 지하 심부에서의 상업적 규모로의 실현을 위해서는 많은 연구가 필요하다. EGS 지열발전의 상용화를 위해서는 실증연구를 통해 수리자극 기술의 현지 적용 시의 문제점을 파악하고 해결 방안을 찾는 것이 가장 핵심적이며 세계 각국에서 연구가 진행 중이다(Min et al., 2013a, b).

독일은 전 세계에서 신재생에너지 개발을 가장 적극적으로 추진하고 있는 국가 중 하나로 2014년 기준 총 국내 발전량의 25.8%를 신재생에너지원이 담당하였다. 독일의 신재생에너지원은 풍력, 바이오매스, 태양광, 수력 등이 주력을 이루고 있으며 지열의 경우 신재생에너지 발전량의 0.1%로 아직 미미한 역할을 하고 있다(BDEW, 2014). 하지만 기저부하를 담당할 수 있고 열에너지에 이용할 수 있는 장점 등으로 인해 독일정부는 연구개발 지원, 시장에서의 인센티브, 그리고 kWh당 25 유로센트의 발전차액보상제도 (Feed-in-Tariff) 등을 활용하여 지열에너지의 확대를 지원하고 있다(Weber

et al., 2015). 우리나라와 같이 비화산지대 국가인 독일에는 지열히트펌프, 지역난방 등을 위시한 지열직접이용으로 약 2,850 MWt급, 지열발전으로 27 MW급의 설비용량이 설치되어 있다. 이러한 지열에너지는 북독일 분지(North German Basin), 남독일의 몰라스 분지(Molasse Basin) 그리고 상부 라인 그라벤(upper Rhine Graben) 지역에서 집중적으로 개발되고 있다. 특히, 지열발전은 현재 총 7기의 지열발전소가 운영 중으로 이중 3개는 지역난방과 연계하여 열과 전력을 동시에 생산하고 있으며, 아직은 주요한 발전원이 되지 못하고 있으나 지난 2010년의 7.3 MW에 비하여 네 배가량 증가하였다(Weber et al., 2015).

본 논문에서는 독일 북부 그로스 쉐네벡(Groß Schönebeck) EGS 실증 프로젝트에서 진행된 연구개발 내용 중 수리자극 분야에 관련되는 사항을 중점적으로 소개하여 향후 국내에서 진행될 각종 실증연구에서 참고로 활용될 수 있도록 준비했다.

2. 그로스 쉐네벡 EGS 실증 현장 개괄

그로스 쉐네벡(Groß Schönebeck) EGS 실증 현장은 독일 동북부 베를린의 북쪽 약 40 km 지점에 위치하고 있다. 저류암은 실리카쇄설성(siliciclastic) 암석과 화산암(volcanic) 암석이 분포하고 있다(Fig. 1). 저류암은 심도 3,830 m에서 4,250 m에 위치하고 있으며 심부 온도는

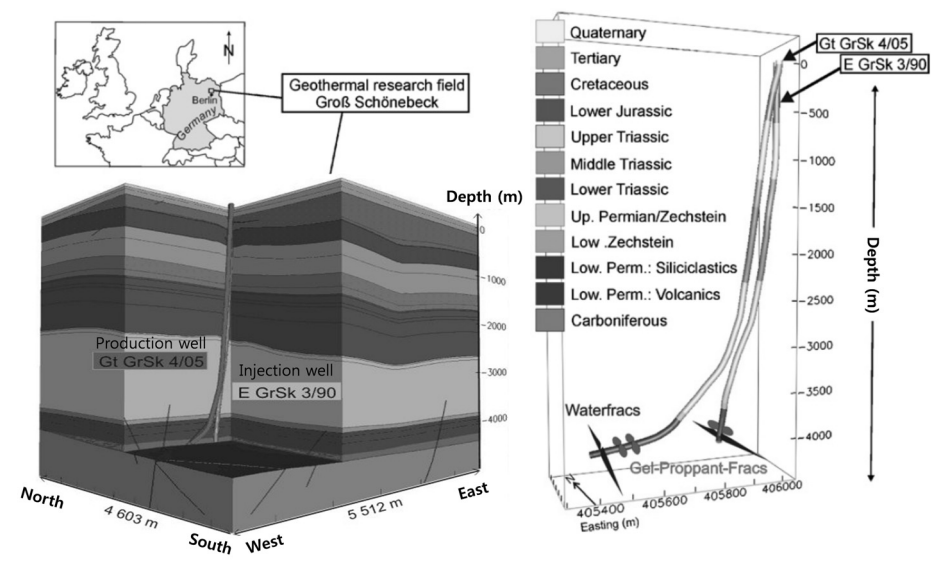


Fig. 1. Location and geological formation of Groß Schönebeck EGS research site (in the left) and the layout of injection and production wells (in the right) (modified from Zimmermann et al., 2010)

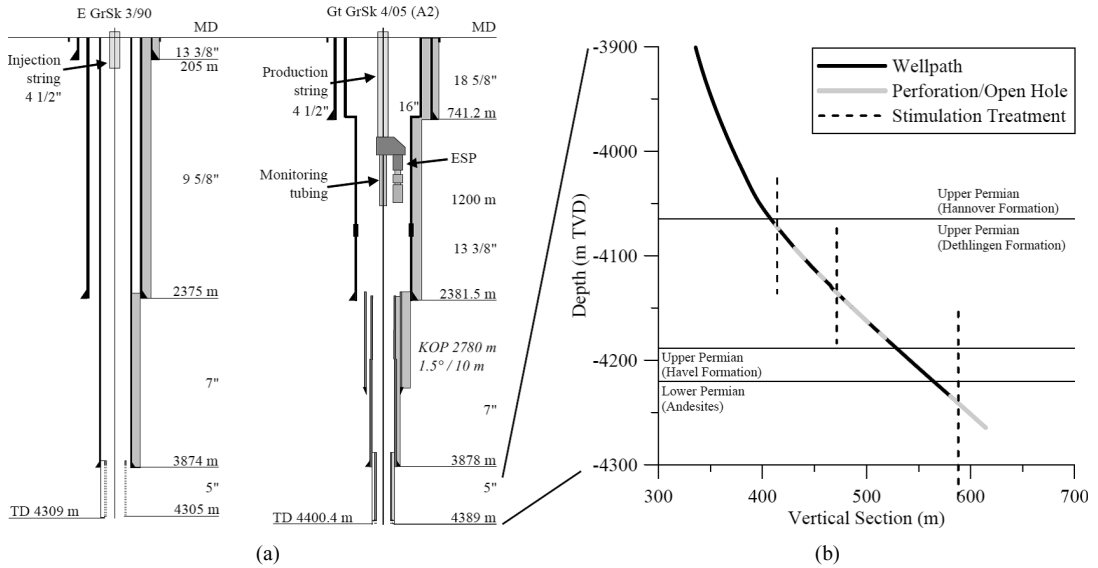


Fig. 2. Well design and completion in Groß Schönebeck EGS research site (modified from Reinsch et al., 2015). (a) Injection well(E GrSk 3/90) and production well(Gt GrSk 4/05 A2) layout. Electrical submersible pump (ESP) was installed at around 1,200 m depth in the production well. (b) production well completion. Portions of perforated section or open hole section are indicated in grey color and the location of stimulation treatment is noted as dotted line

150°C이다. 이 현장은 과거 육상 가스 탐사에 쓰이던 곳이었으나, 기존의 시추공 중 한 곳을 활용하여 2001년에 지열에너지 실증 현장으로 전환되었다.

현재 주입정(E GrSk 3/90) 및 생산정(Gt GrSk 4/05) 두 개의 시추공이 현장에서 활용되고 있다. 이 중 주입정은 폐쇄된 가스 탐사공이었으나 2001년에 새로이 개발되어 심도 4,305 m까지 추가로 시추하였다. 생산정은 실증연구를 위해 새롭게 개발된 시추공으로, 심도는 4,404 m이며 약 2,780 m 부터는 방향성 시추가 진행되었고 최종 심도에서 약 48° 경사를 갖고 있다. Fig. 2는 주입정 및 생산정의 완결된 종단면과 생산정의 시추 궤적 및 천공된 위치 등을 표시하고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 최종 완결된 시추공의 직경은 약 12.7 cm (5인치)이며 최종 심도 4,305 m(주입정) 및 4,404 m(생산정) 이고, 하부에는 케이싱이 설치되지 않은 나공(open hole) 상태로 있다. 그림에 표시된 것처럼 수리자극 실험을 실시하는 구간은 나공 상태이거나 혹은 라이너 설치 후 천공을 실시하였다. 또한 생산정의 심도 1,200 m 지점에 전기식 수중펌프(Electrical submersible pump, ESP)가 설치되었으며 펌프 아래에 온도 및 압력 게이지가 부착되었다.

Fig. 3은 현장 전경으로 주입정과 생산정의 간격은 지상에서 약 28 m, 지하 심부에서 475 m이다.



Fig. 3. Groß Schönebeck EGS research site in northern Berlin (picture taken in May, 2015). Production well is in the upper left and injection well head is in the upper right. The distance between injection and production well is 28 m on the surface and 475 m at the final depth. Binary geothermal power plant with the capacity of 1.1 MW is also in place. The site is located far from the residential area and the total area of the site is around 6,000 m²

3. 수리자극 실험 개괄

3.1 현지응력 모델(In situ stress model)

그로스 쉘네베크 EGS 부지는 심도 4.1 km까지의 페름

Table 1. Summary of in-situ stress conditions of Groß Schönebeck EGS research site (modified from Moeck et al., 2009a)

Layer	Sandstone	Volcanic (andesite)
<i>In situ stress field</i>		
$S_v(S_v^e)$	100(57) MPa	103(60) MPa
$S_{Hmax}(S_{Hmax}^e)$	98(55) MPa	105(62) MPa
$S_{Hmin}(S_{Hmin}^e)$	55(12) MPa	72(29) MPa
<i>Stress Orientation</i>		
S_{Hmax}		$18.5^\circ \pm 3.7^\circ$
S_{Hmin}		$108.5^\circ \pm 3.7^\circ$

기 하부 적색 사암층(Rotliegend)과 심도 4.2 km의 화산암(안산암)층으로 이루어져 있으며 각각에 대해 현지 응력 측정이 이루어졌다(Moeck et al., 2009a, Zimmermann and Moeck., 2008, Moeck et al., 2009b). 현지응력은 3차원 구조해석(3D structural modeling), 단층해석(fault mapping), 마찰계수에 따른 허용응력비와 전단미끄러짐 경향해석(slip tendency analysis), 공벽파괴 해석, 수압 파쇄 시험과 누설시험(leakoff test)을 통해 도출했다. 그 결과 최소수평주응력은 수직응력의 0.55배, 최대수평주응력은 수직응력의 0.78 - 1.0배로 응력상태는 정단층에서 주향이동단층 응력상태에 걸쳐 나타났다(Moeck et al., 2009a).

사암층의 경우 수직응력은 암석 밀도에 의한 상재하중으로부터 계산했고 최소수평주응력은 수압파쇄법을, 최대수평주응력은 시추공 공벽파괴 해석을 통해 분석했다. 화산암층의 경우 수직응력은 상재하중으로부터 계산해 냈고 최소수평주응력은 누설시험(leakoff test)으로부터 측정되었다. 마찰계수에 따른 허용응력비를 분석하면 최대수평주응력은 100-140 MPa의 범위에 놓이나, 사암층과 화산암층 각각의 응력비가 서로 유사할 것이라는 가정 하에 화산암층의 최대수평주응력을 103 MPa 혹은 그 이상으로 예측했다. 한편 심도 4.1 km에서의 정수압 43 MPa를 가정해 유효응력을 계산하고 사암층 수압파쇄 시험의 파쇄면 방향으로부터 주응력 방향을 예측했으며, 사암층과 화산암층의 최종적인 현지 응력 측정 결과는 Table 1과 같다.

3.2 개별 주입정 및 생산정에서의 수리자극(Hydraulic stimulations in injection and production wells)

2001년 개발된 이래 2013년까지 주입정에서의 수리자극 실험, 생산정에서의 수리자극 실험, 주입정과 생산정을 연결하는 순환 수리자극 실험이 각각 진행되었다. 주입정 및 생산정에서 독립적으로 진행된 수리자극 실험은 Table 2에 정리되어 있다.

Table 2에 나타난 바와 같이, 주입정에서는 2002 - 2003년에 걸쳐, 생산정에서는 2007년에 수리자극이 실시되었다. 주입정에서의 수리자극의 경우, 초기 2회는 젤과 균열지지체(proppant)를 단시간 동안 고압으로 주입해 균열 간극을 확보한 뒤, 2 회의 추가 수리자극에서 장시간 동안 대량의 물을 주입해 균열을 확장시키는 방법이 사용되었다. 주입정에서의 수리자극 결과 최소수평주응력에 수직인 NE-SW 주향으로 준수직방향의 균열이 발생했으며, 수압파쇄 시물레이션을 통해 예측한 최종 균열 크기는 반경 160 m, 높이 96 m로 나타났다. 수리자극 전후의 주입지수(II, injectivity index) 측정 결과 2001년 $0.97 \text{ m}^3/(\text{hr} \cdot \text{MPa})$ 에서 2003년 $7.5 \text{ m}^3/(\text{hr} \cdot \text{MPa})$ 로 증가했다.

생산성지수(PI, productivity index)와 주입지수(II, injectivity index)는 석유가스 및 지열개발 분야에서 널리 쓰이는 개념으로서, 본 논문에서 사용한 생산성지수 및 주입지수는 다음과 같이 표현된다.

$$\text{동적 생산성지수: } PI_{dyn} = \frac{Q}{P_{ini} - P_{dis}}$$

$$\text{동적 주입지수: } II_{dyn} = \frac{Q}{|P_{ini} - P_{dis}|}$$

위 식에서의 우변이 일반적인 생산성지수와 주입지수에 해당한다. 동적 생산성지수는 시추공에 대한 수리적 실험 종료 40 분 전부터 10 분 전까지 30 분간의 생산성지수 값의 평균을 구한 것이며, 동적 주입지수는 마찬가지로 실험 종료 10 분 전까지의 30 분 간 주입지수 값의 평균을 구한 것이다. 위의 식에서 Q는 유량, P_{ini} 는 저류층 내 유체압력, P_{dis} 는 시추공 내에서 저류층과의 주입 및 생산이 이루어지는 영역에서의 유체압력을 뜻한다. 생산성지수가 높을수록 보다 효과적으로 저류층에서 유체를 생산해낼 수 있음을 나타내며, 마찬가지로 주입지수가 높을수록 저류층 내로의 유체 주입이 효

Table 2. Summary of single-well hydraulic stimulation results in two wells (Blöcher et al., 2015b)

well	E GRSk 3/90 (injection)						Gt GrSk 4/05 A(2) (production)		
Treatment	Initial frac	First gel-Proppant frac	Second gel-Proppant frac	Second gel-Proppant frac	First Water frac	Second Water frac	Water frac	First gel-Proppant frac	Second gel-Proppant frac
<i>Date and time</i>									
Year	2002	2002	2002	2002	2003	2003	2007	2007	2007
Duration [h]	1.9	9.3	1.7	9.5	96	67	106.5	1.5	2
<i>Treatment parameter</i>									
Frac interval [MD]	4140-4200	4140-4200	4088-4128	4088-4128	3883-4294	4135-4305	4350-4404	4204-4208	4118-4122
Completion	Open hole	Open hole	Open hole	Open hole	Open hole	Slotted liner	Slotted liner	Perforated liner	Perforated liner
Maximum flow rate [m ³ /h]	153 (stepwise)	138	121 (stepwise)	120	86.4	144	540	240	210
Cumulative volume [m ³]	129	107	103	120	4,284	7,291	13,170	280	310
Maximum well head pressure [MPa]	54.6	45.2	50.3	44.9	22	25	58.6	35	40
Gel type	HTU*/brine	HTU*/brine	HTU*/brine	HTU*/brine	-	-	-	Cross-linked	Cross-linked
Proppant type	-	Carbo-Lt	-	Carbo-Lt	-	-	Quarz sand	High strength	High strength
Proppant mesh size	-	20/40	-	20/40	-	-	20/40	20/40	20/40
Proppant mass [kg]	-	8,796	-	8,580	-	-	24,400	95,000	113,000
<i>Fracture dimension estimated by hydraulic fracturing simulator</i>									
Half length [m]	-	32	-	-	-	160	190	57	60
Height [m]	-	72	-	-	-	96	135	115	95
Aperture [cm]	-	0.16	-	-	-	0.5	0.8	0.53	0.53
References	Legarth et al., 2003, Legarth et al., 2005				Zimmermann et al., 2009		Zimmermann et al., 2010	Zimmermann and Reinicke, 2010, Zimmermann et al., 2011	Zimmermann et al., 2011, Blöcher et al., 2010

* Cationic, hydrophilic and polymer based gel

과적으로 이루어짐을 뜻한다.

한편 생산정에서의 수리자극의 경우, 주입정과는 달리 초기에 물을 이용한 대규모 수압파쇄를 먼저 실시한 후 이와 각각 다른 두 가지 심도 구간에서 젤과 균열지지체를 주입해 추가 균열을 발생시키는 방법을 택했다. 그 결과 수리자극 전후에 생산성지수(PI, productivity index)가 $2.4 \text{ m}^3/(\text{hr}\cdot\text{MPa})$ 에서 $10.1 \text{ m}^3/(\text{hr}\cdot\text{MPa})$ 로 약 4.25 배 증가했다. 2009년에는 생산정에서 시추공 부근의 잔류 이수를 제거하기 위하여 코일 튜빙(coiled tubing)을 이용해 산성처리를 하였으며 이를 통해 생산율은 $13\text{-}15 \text{ m}^3/(\text{hr}\cdot\text{MPa})$ 까지 향상될 수 있었다(Blöcher et al., 2015b).

시추코어는 주입정에서만 회수 가능하였으며 회수된 코어에 대하여 다양한 투수율 및 다공탄성정수를 측정하였다.

Fig. 4는 수리자극 실험을 통해 생성된 균열의 방향과 시추공의 궤적을 평면도 상에 표시한 것으로, 발생된 균열이 최소수평주응력에 수직한 방향으로 발달한 것을 알 수 있다. 또한 주입정과 생산정에서 젤과 균열지지체를 이용한 수리자극과 물만을 주입하는 수리자극이 모두 수행되었음을 보여준다.

수리자극 실험을 통해 발생하는 균열의 크기와 균열 지지체의 유동을 예측하기 위해서 3차원 수압파쇄 시뮬레이션 프로그램인 FRACPRO를 사용하였다(Zimmerman and Reinicke, 2010). 3차원 수압파쇄 모델의 입력값으로는 기본적으로 응력 상태, 암반 투수율, 탄성계수 등의 암석역학적 인자가 요구되며, 균열지지체 유동을 고려하기 위해 추가적으로 균열지지체 및 수송 유체 정보가

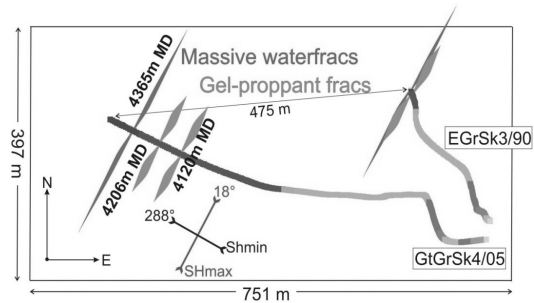


Fig. 4. Well trajectories and stimulation locations in plan view (Zimmermann and Moeck, 2008). Locations of waterfracs and gel-proppant fracs are indicated

가 필요하다. 그로스 웨네백의 생산정 사례의 경우, 실내실험을 통해 일차적으로 결정된 균열지지체 및 수송 유체의 특성자료를 FRACPRO에 입력하여 균열지지체 유동을 고려한 수리자극 시뮬레이션을 수행했다. 시뮬레이션에는 균열의 높이 성장을 고려한 3차원 수압파쇄 모델이 이용되었으며, Fig. 5는 생산정에서의 젤-균열지지체 수리자극 시뮬레이션 결과로 계산된 균열 간극, 균열지지체 밀집도(concentration) 및 균열 수리전도도(fracture conductivity)를 나타낸 것이다. 시뮬레이션 결과 균열지지체가 투수율이 낮은 다층 구조를 이루어 효과적으로 기능할 수 있을 것으로 예측되었고, 실제 수리자극 직후의 생산 시험을 통해 생산성지수 변화를 계속한 결과 생산정 대상 단일 수리자극에서 젤-균열지지체 수리자극이 뚜렷한 생산성지수 증가 효과를 보였다.

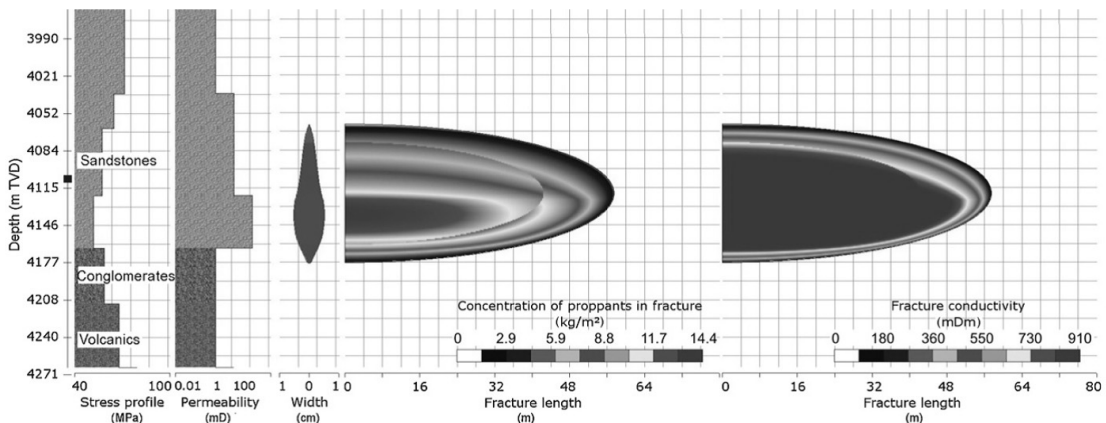


Fig. 5. Gel-proppant stimulation in well GtGrSk4/05. The stress profile shows the minimum principal stress for each formation (Zimmermann and Reinicke, 2010)

3.3 주입정과 생산정을 연결하는 순환수리시험 (Circulation tests)

주입정과 생산정을 연결하는 순환수리시험은 2011년부터 2013년까지 진행되었다. 순환수리시험은 총 139회 실시되었으며 시험 시간은 1시간에서 165 시간까지 다양하게 실시되었다(Blöcher et al., 2015b). 2011년도의 개별 순환시험에서의 생산량은 4.4 m³ 이하에서부터 2,567 m³까지 다양하였으며 총 18,900 m³의 유체가 저류층으로부터 생산되었다. 2012년에는 4,800 m³의 산성화시킨 물을 추가로 주입하였으며 이에 따라 유체 누적 주입량 23,700 m³을 달성했다. 시간대별 누적 주입량 및 생산량은 Fig. 6과 같다.

순환시험 기간 동안 1) 생산성지수가 2011년 6월 8.9 m³/(hr*MPa)에서 2013년 11월 0.6 m³/(hr*MPa)까지 비선형적으로 감소하였고 2) 주입정에서는 시험 일정에 따라 주입지수가 증가 혹은 감소하는 현상이 나타났다. 이에 대해 다각도의 원인 분석이 이루어졌다(Blöcher et al., 2015a,b). 또한 생산량의 증대를 위해 기존의 두 시추공을 주입정으로 활용하고 세 번째 지열정을 추가 시추하는 계획이 논의 중이며 이에 대한 연구도 이미 발표된 바 있다(Blöcher et al., 2015a)

3.3.1 생산성지수의 감소

생산정에서의 생산성지수 감소의 원인으로 먼저 시추공 내부에서의 광물 침전을 들 수 있다. 2012년의 물리검층 결과 검층장비가 4,116 m 심도에 걸려서 최종 심

도인 4,360 m까지 내려가지 못하는 현상이 발생했고, 코일 튜빙으로 제거된 침전 광물을 분석한 결과 저류층으로부터의 고체상의 유입 없이 구리, 중정석(barite), 방해석(calcite), 자철석(magnetite) 등의 광물이 시추공 내에서 침전된 것으로 확인되었으며 총 600 L의 시추공 내 침전 광물을 제거했다.

또한 생산정 부근의 저류층 내에서 구리가 고체상으로 환원되어 공극구조를 메우는 현상이 치명적인 것으로 지적되었는데, 이는 구리보다 강한 산화 경향을 보이는 철강 재질의 케이싱에 의해 적색사암층 내에 존재하는 높은 농도의 구리 이온이 고체 구리로 환원되기 때문인 것으로 밝혀졌다. 실내실험 결과 구리 이온이 완전히 환원되어 암석의 공극구조를 메우는 것이 확인되었다.

그로스 쉘레벡 부지가 과거 가스 탐사전이였다는 사실과 맞물려, 저류층 내에서의 액체-기체 다상 유동(two-phase flow)이 액체에 대한 유효 투수율을 현저히 낮출 수 있음이 밝혀졌다. 시추공 내에서의 유체 포집 결과 질소와 메탄가스의 존재가 확인되었고, 사암 시료를 염수와 질소 가스로 채운 상태에서 염수 대상의 투수율을 측정할 실험 결과 질소 가스가 총 공극부피의 3 %만을 차지하더라도 염수 대상의 유효투수율이 25 % 하락했다. 또한 생산정에서의 지속적인 생산 시험으로 저류층 내 유체압력이 감소하면, 이에 따라 기체의 용해도가 감소해 더욱 많은 양의 질소 및 메탄이 기체상으로 빠져나올 수 있음이 지적되었다.

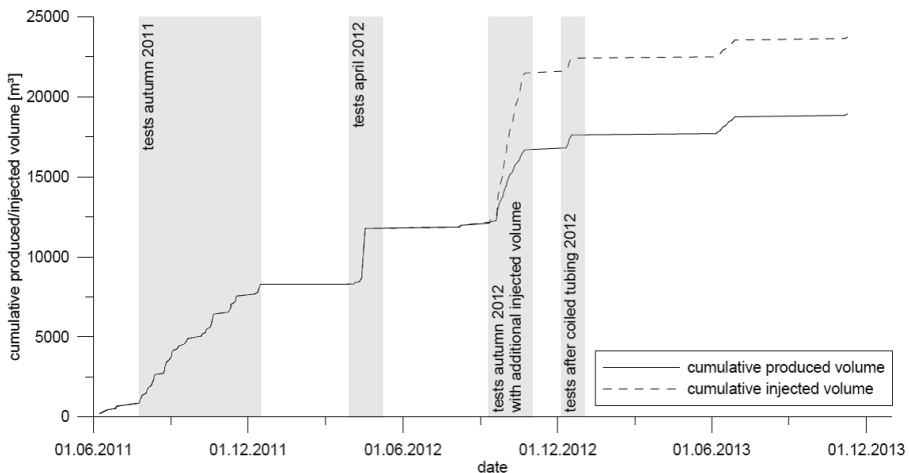


Fig. 6. Cumulative produced and injected volume during circulation test connecting injection and production wells (Blöcher et al., 2015b)

3.3.2 주입지수의 변동

주입정에서의 주입시험에서는 주입 조건에 따라 주입 지수가 증가 혹은 감소하였는데, 이는 주입 유체의 온도 및 염도 변화에 따라 각각 다른 양상을 나타낸 것으로 판단되었다. 고온 저류층 내부로 유체주입이 지속되며 온도가 하강하는 경우, 이에 따라 유체 점도가 증가하며 유체 주입에 대한 저항이 커져 주입지수가 낮아지는 결과를 낳았다. 반면 염수가 아닌 산성 청수를 주입

유체에 더한 경우, 주입 유체 전체의 염도가 낮아짐에 따라 점도가 감소해 주입지수가 증가하는 것으로 판단되었다.

3.4 전단 미끄러짐 해석(Slip tendency analysis)

전단 미끄러짐 해석은 주어진 응력장 하에서 임의 방향의 단층에 대한 전단 경향성을 계산함으로써 전단이 발생할 가능성 및 가장 가능성이 높은 전단 방향을 예

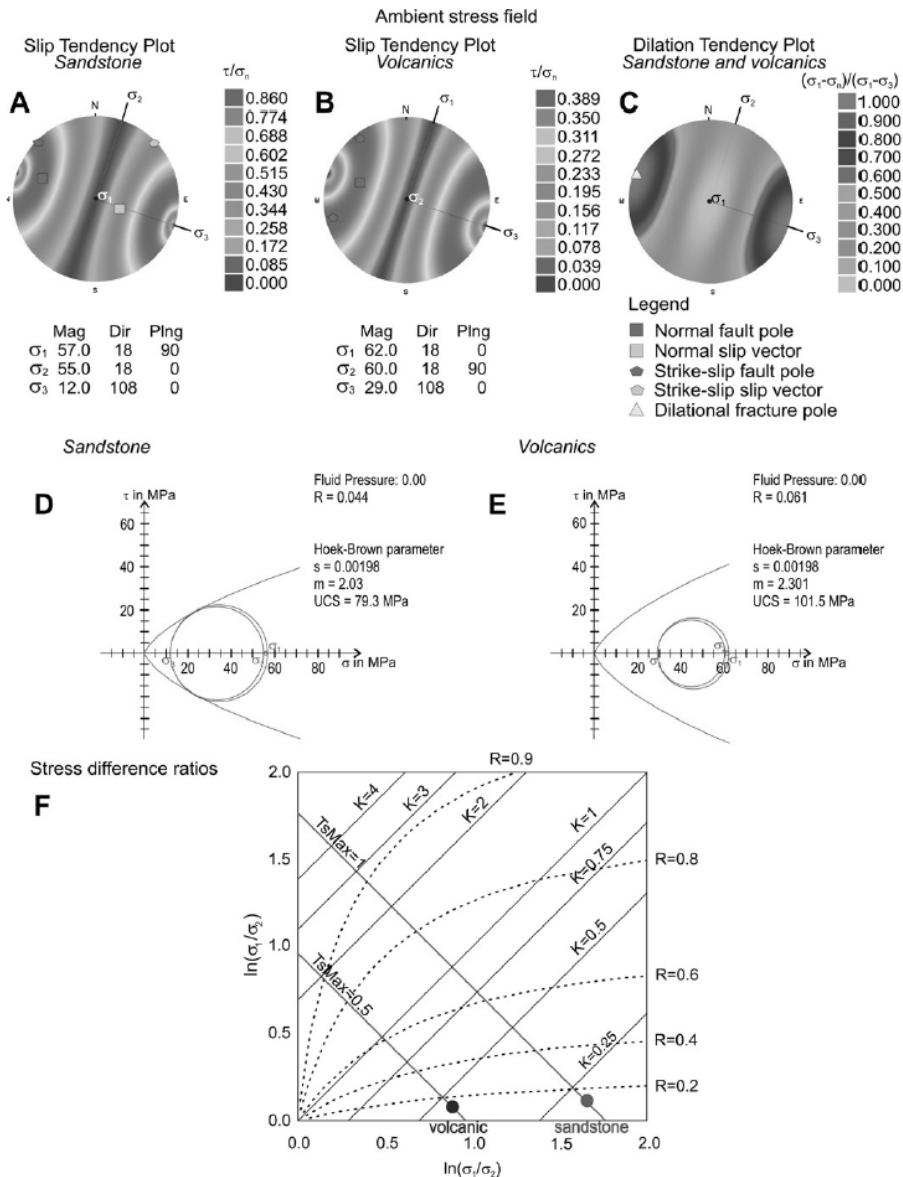


Fig. 7. Slip tendency analysis performed for the site (Moeck et al., 2009a)

측할 수 있는 기법이다. 그로스 쉘네벡 EGS 프로젝트에서는 수리자극 대상 지층 부근의 사암층 및 화산암층에 대해 각각 현저응력 상태를 조사하고 흑브라운(Hoek-Brown) 파괴기준을 이용해 각 지층에서 전단균열을 발생시키기 위해 요구되는 유체압력을 계산하는 한편, 전단 미끄러짐 해석을 통해 수리자극에 의한 전단균열이 발생할 단층 방향을 예측하는 연구가 수행되었다(Moeck et al., 2009a).

그로스 쉘네벡 부지의 사암층 및 화산암층 내의 단층에 대해 전단 미끄러짐 해석을 수행한 결과, 대상 부지의 흑브라운 파괴기준에 대해 사암층은 임계응력상태에 놓인 반면(Fig. 7, D) 화산암층은 전단파괴가 발생하기까지 약 24.5 MPa의 공극수압 증가가 필요하다고 판단되었다 (Fig. 7, E). 또한 4.1-4.2 km 심도에서 단층면에 가해지는 강한 수직응력에 의해 인장 형태의 균열 팽창은 발생하기 어려운 것으로 예측되었다. 화산암층을 대상으로 한 실제적인 수리자극에 의한 균열 형성은 최초 20 MPa의 유체 가압에 의해 발생했으며, 그 결과 NW 주향과 NE 주향을 갖는 균열면이 발생했다. 이러한 결과는 NE 주향의 정단층 또는 NNE 주향, NNW 주향의 주향이동단층 방향으로의 전단 경향성이 가장

높게 나타난 예측 결과(Fig. 7, A, B)와 부합했다.

3.5 미소진동 관측(Induced microseismicity monitoring)

그로스 쉘네벡 부지의 화산암층에서의 수리자극 수행 시 Fig. 8에 나타난 바와 같이 총 5개의 지진계를 지표 및 심부에 설치하여 미소진동을 관측하였다(Kwiatek et al., 2010). 그 결과 모멘트 규모 -1.0 에서 -1.8의 범위에서 총 80 회의 미소진동이 관측되었는데, 이는 Soutz 프로젝트와 같은 여타 EGS 수리자극 사례에서 수천 회의 미소진동이 발생하며 최대 규모가 2-3을 상회하는 것과 비교할 때 극히 미미한 진동만이 관측된 것이다. Kwiatek은 이와 같이 미미한 미소진동이 관측된 원인으로 1) 진원과 수신기 간의 먼 거리, 2) 수리자극 대상 지층과 수신기 사이의 두꺼운 퇴적층에서의 감쇄, 3) 고주파 대역에 집중된 신호의 빠른 감쇄 및 4) 수리자극 대상 지층 위의 증발진류암(evaporite)에 의한 신호의 감쇠 등을 들었다.

또한 높은 주입율과 주입압력을 갖는 대규모 수리자극이 시작된 이후에도 여타의 EGS 수리자극에서 관측되었던 진동 발생율(seismicity rate)의 급격한 증가가 관측되지 않았다. 미소진동 발생율에서 보이는 이와 같

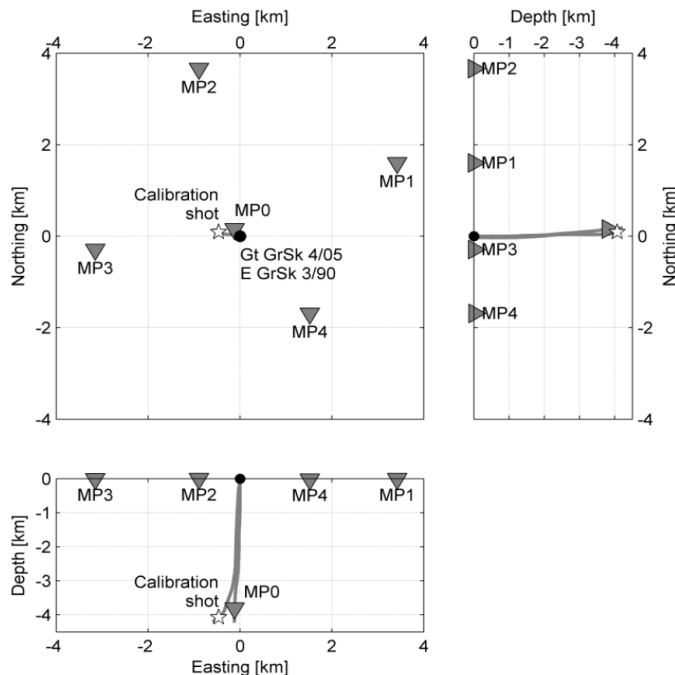


Fig. 8. Seismic network installed at Groß Schönebeck site. Seismometer locations are denoted as triangles and star indicate calibration shot(Kwiatek et al., 2010)

은 차이는 그로스 쉐네벡 부지의 지질적, 지질구조적인 차이와 관련된 것으로 판단되었으며, Kwiatek은 공극 수압 증가에 따른 전단파괴 이외에 암석의 취성파괴를 유발하는 또 다른 메커니즘의 작용에 의해 진동 발생의 급증 없이 수리자극이 발생했을 것이라 유추했다.

한편 화산암층을 대상으로 한 수리자극이 사암층에서의 수리자극 이후에 실시되었다는 점에서, 화산암층 내에서 수리자극을 실시했음에도 사암층 수리자극에 의해 형성된 유동 경로를 따라 유체가 일부 분산되며 강한 미소진동의 발생에 필요한 만큼의 압력 축적을 불가능하게 했을 것이라는 설명 또한 제시되었다. 본 현장에서는 기존 절리의 전단파괴 보다는 인장균열의 성장이 보다 주요한 메커니즘이 되어 작은 미소진동이 관측된 것으로 생각되나 추가적인 연구를 통해 미소진동 발생 메커니즘에 대한 규명이 필요하다.

4. 결론

독일의 경우 우리나라와 같이 비화산지대에 속하나 지열에너지 이용을 위해 적극적인 연구개발 및 행정적 지원을 하고 있어 우리나라에 교훈이 된다. EGS(Enhanced Geothermal Systems) 지열발전은 실험실 환경을 넘어선 실증연구가 핵심으로 이를 통해 수리자극의 효율을 극대화시키는 방법을 강구하여야 한다. 그로스 쉐네벡 EGS 실증현장에서의 연구는 단일 시추공에서의 수리자극 실험을 통해 주입률 혹은 생산율을 4-5배가량 증가시킬 수 있다는 것을 보여주었으며, 미소진동의 발생이 극히 미미했던 점은 고무적인 결과라 할 수 있다. 하지만 순환수리시험을 통해 생산유량이 2년 만에 대폭 감소한 것으로 나타나 이에 대한 정밀한 원인 분석 및 세 번째 시추공 등을 통해 생산량을 증대시키려는 노력이 진행 중이다. 독일 그로스 쉐네벡에서 진행되는 연구는 EGS 지열발전을 위한 수리자극 기술의 현 단계 성과 및 한계를 동시에 보여주는 사례로 차후에 진행될 다른 지역에서의 실증연구에 참고가 된다.

사 사

본 연구는 2015년도 산업통상부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(No.20133030000240)의 일환으로 진행되었으며 자료수집에 도움을 준 독일 연방지질과학연구원(GFZ) Thomas Reinsch 박사와 Guido Blöcher 박사에게 감사드린다. 또한 본 논문의 미흡한 점을 지적해주신 익명의 심사자 분들께 감사드린다.

References

- Bertani, R., 2015, Geothermal Power Generation in the world 2010-2014 Update report, World Geothermal Congress, Melbourne, Australia, Paper No. 01001.
- BDEW, 2014, Press release on German Energy mix 2014 (date of issue: 29 Dec 2014, in German).
- Blöcher, G., M. Cacace, T. Reinsch, N. Watanabe, 2015a, Evaluation of three exploitation concepts for a deep geothermal system in the North German Basin, *Computers and Geosciences*, 2015, 82, 120-129.
- Blöcher, M.G., T. Reinsch, J. Henningses, H. Milsch, S. Regenspurg, J. Kummerow, H. Francke and G. Zimmermann, 2015b, Hydraulic history and current state of the deep geothermal reservoir Groß Schönebeck. *Geothermics* (in press).
- Blöcher, M.G., G. Zimmermann, I. Moeck, W. Brandt, A. Hassanzadegan and F. Magri, 2010, 3D numerical modeling of hydrothermal processes during the lifetime of a deep geothermal reservoir. *Geofluids*, 10.3, 406-421.
- Kwiatek, G., M. Bohnhoff, G. Dresen, A. Schulze, T. Schulte, G. Zimmermann and E. Huenges, 2010, Microseismicity induced during fluid-injection: A case study from the geothermal site at Groß Schönebeck, North German Basin. *Acta Geophysica*, 58.6, 995-1020.
- Legarth, B., E. Huenges and G. Zimmermann, 2005, Hydraulic fracturing in a sedimentary geothermal reservoir: Results and implications. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 42.78, 1028-1041.
- Legarth, B., T. Tischner and E. Huenges, 2003, Stimulation experiments in sedimentary, low-enthalpy reservoirs for geothermal power generation, Germany. *Geothermics*, 32.4, 487-495.
- Lund, J.W. and T.L. Boyd, 2015, Direct utilization of geothermal energy 2015 Worldwide review, World Geothermal Congress, Melbourne, Australia, Paper No. 01000.
- Min, K.B., W.S. Yoon and Y. Song, 2013a, Introduction to EGS Geomechanics special issue. *Korean Journal of Rock Mechanics, Tunnel & Underground Space*, 23.6, 455-456.
- Min, K.B., Y. Song and W.S. Yoon, 2013b, EGS Power Generation and Hydraulic Stimulation. *Tunnel & Underground Space*, 23.6, 506-520.
- Moeck, I., G. Kwiatek and G. Zimmermann, 2009a, Slip tendency analysis, fault reactivation potential and induced seismicity in a deep geothermal reservoir. *Journal of Structural Geology*, 31.10, 1174-1182.
- Moeck, I., H. Schandelmeier and H.G. Holl, 2009b, The stress regime in a rotliend reservoir of the northeast german basin. *International Journal of Earth Sciences* 98.7, 1643-1654.
- Reinsch, T., S. Regenspurg, E. Feldbusch, A. Saadat, E. Huenges, K. Erbas, G. Zimmermann and J. Henningses, 2015, Reverse Cleanout in a Geothermal Well: Analysis of a Failed Coiled-Tubing Operation. *SPE Production & Operations*, Paper No.174080.

- Song, Y. and T.J. Lee, 2015, Geothermal Development in the Republic of Korea: 2010-2014 update, World Geothermal Congress, Melbourne, Australia, Paper No. 01008.
- Weber, J, B. Ganz, R. Schellschmidt, B. Sanner and R. Schulz, 2015, Geothermal energy use in Germany. World Geothermal Congress, Melbourne, Australia, Paper No. 01045.
- Zimmermann, G., G. Blöcher, A. Reinicke and W. Brandt, 2011, Rock specific hydraulic fracturing and matrix acidizing to enhance a geothermal system—Concepts and field results. *Tectonophysics*, 503.1, 146-154.
- Zimmermann, G, and I. Moeck, 2008, Geothermal research well in Groß Schönebeck - from design to stimulation treatment, Brandenburg. *geowiss. Beitr*, 15, 1/2, 155-164 (in German).
- Zimmermann, G., A. Reinicke, W. Brandt, G. Blöcher, H. Milsch, H. Holl, I. Moeck, T. Schulte, A. Saadat and E. Huenges, 2008, Results of Stimulation Treatments at the Geothermal Research Wells in Groß Schönebeck, Germany. Proc 33th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Paper No. SGP-TR-185.
- Zimmermann, G. and A. Reinicke, 2010, Hydraulic stimulation of a deep sandstone reservoir to develop an enhanced geothermal system: Laboratory and field experiments. *Geothermics*, 39.1, 70-77.
- Zimmermann, G., I. Moeck and G. Blöcher, 2010, Cyclic waterfrac stimulation to develop an enhanced geothermal system (EGS)—conceptual design and experimental results. *Geothermics*, 39.1, 59-69.
- Zimmermann, G., T. Tischner, B. Legarth and E. Huenges, 2009, Pressure-dependent production efficiency of an enhanced geothermal system (EGS): stimulation results and implications for hydraulic fracture treatments. In *Rock Physics and Natural Hazards*. Birkhäuser Basel. 1089-1106.



민 기 복

1994년 서울대학교 자원공학과 공학사
1999년 서울대학교 자원공학과 공학석사
2004년 스웨덴 왕립공과대학(Royal Institute of Technology) 공학박사

Tel: +82-2-880-9074
E-mail: kbmin@snu.ac.kr
현재 서울대학교 에너지자원공학과 부교수



박 세 혁

2014년 서울대학교 자원공학과 공학사

Tel: +82-2-880-7232
E-mail: sehyeok@snu.ac.kr
현재 서울대학교 에너지시스템공학부 박사과정



Günter Zimmermann

1987 Bonn University, Germany, Diploma Physics
1991 Technical University Berlin, Germany, Ph.D. Applied Geophysics
2006 Technical University Berlin, Germany, Habilitation Applied Geophysics
2012 Technical University Berlin, Germany, Professor Applied Geophysics

Tel: +49-331-288-1458
E-mail: zimm@gfz-potsdam.de
Current affiliation: Helmholtz Centre Potsdam, GFZ German Research Centre for Geosciences, Section 4.1 Reservoir Technologies & International Centre for Geothermal Research (ICGR)