

Basel EGS<sup>1)</sup> Project의 미소진동관리 사례연구

이상돈

## Case Study of Microseismic Management Systems for Basel EGS Project

Sangdon Lee

**Abstract** In this case study, I examined the microseismic safety management system of Deep Heat Mining Basel (DHMB) as EGS Geothermal Project which was conducted in Basel, Switzerland. EGS Geothermal Power projects which require induced seismic event by stimulation for creation of EGS geothermal reservoir have to be controlled pressure and flow rate of stimulation by establishment of microseismic safety management system. Traffic light system and Communication response procedure of DHMB project to respond step by step corresponding microseismic event intensity through continuous monitoring during stimulation period have been managed and established in advance of stimulation.

However, the project was discontinued because of an earthquake to occur larger than expected one due to post-injection seismicity occurring in the geothermal reservoir after completion of injection for stimulation. The result of post analysis, Real-time traffic light system was verified to need a establishment of new microseismic safe management system to be considered post-injection seismicity phenomenon.

**Key words** EGS, Stimulation, Microseismic event, Safety management system, Monitoring

**초 록** 이 사례연구에서는 스위스 바젤에서 진행되었던 인공지열발전(EGS) 프로젝트인 Deep Heat Mining Basel(DHMB)의 미소진동 관리시스템을 살펴보았다. 인공지열발전 프로젝트에 꼭 필요한 인공지열저류층 생성을 위한 수리자극으로 인해 발생하는 유도진동은 안전관리시스템을 수립하여 수리자극의 압력과 유량을 관리하여야 한다. DHMB프로젝트에서는 수리자극 기간 동안 지속적인 관측활동을 통해 미소진동 발생 진도에 따라 단계별로 대응하는 경보시스템과 커뮤니케이션 대응 절차가 사전에 수립되어 관리되었다. 그러나 수리자극을 위한 주입 완료 후에도 지열저류층에서 발생한 주입이후 진동현상으로 인해 예상보다 큰 지진이 발생하자 프로젝트가 중단되었다. 사후분석 결과 실시간 경보시스템은 주입이후 진동 현상을 감안한 새로운 미소진동 안전관리시스템을 수립하는 것이 필요하다고 확인되었다.

**핵심어** 인공지열발전, 수리자극, 미소진동 발생, 안전 관리시스템, 관측활동

**Received:** Nov. 6, 2013

**Revised:** Nov. 28, 2013

**Accepted:** Dec. 3, 2013

**\*Corresponding Author:** Sangdon Lee

Tel) +827088167507

E-Mail) lsd9474@gmail.com

712 Vabien III Bldg., 86, Tongil-ro, Jung-gu, Seoul, Korea

1) Enhanced Geothermal System and/or Engineered Geothermal System : 인공지열발전시스템

1. 서론

스위스는 우리나라와 같은 비화산지대로서 양질의 지열에너지자원이 존재하는 지역은 아니지만 1980년대부터 활발한 지열자원 탐사를 통해 지열에너지 개발 프로젝트가 꾸준히 진행되어 왔다. 그 중 1994년에 완공된 Riehen시의 지열 열병합플랜트(시스템설계 GRUNEKO AG)는 최종심도 1,547 m의 생산공과 1,247 m의 재주입공으로 이루어진 Doublet System으로 최대 15 MWth (지열수 온도 64℃, 생산유량 20 l/s)의 난방열을 스위스 Riehen시 1,000가구, 독일의 Lörrach시 500가구에 각각 공급함으로써 스위스에서 심부지열에너지 이용이 가능하다는 것을 실증하였다.

Riehen시 지열 지역난방시스템의 완공에 힘입어 인근 바젤시에서는 새로운 심부지열자원 탐사 프로젝트가 시작되었는데 2001년 7월에 최종심도 2,755 m의 심부지열 탐사공인 Otterbach 2 well의 시추에 성공함으로써 40℃/1 km의 지온경사도와 기반암인 결정질 화강암의 심도를 확인(Dr. Markus O. Häring, 2001)할 수 있었다.

Otterbach 2 well의 성공적인 탐사데이터는 DHMB 프로젝트를 시작할 수 있도록 하는 계기가 되었고 프로젝트 개발 및 관리를 맡은 GEL사 (Geothermal Explorers LTD)와 바젤지역 전력회사인 IWB<sup>2)</sup>(Industrielle Werke Basel)사를 중심으로 한 바젤 EGS지열발전소 건설 프로젝트가 시작되었다.

EGS지열발전 프로젝트에서는 인공지열저류층 생성을 위한 수리자극이 필수적인데 그로 인해 발생하는 미소진동은 안전관리시스템을 수립하여 수리자극의 압력과 유량을 관리하여야 한다. DHMB프로젝트에서는 수리자극 기간 동안 지속적인 관측활동을 통해 미소진동 발생 크기에 따라 단계별로 대응하는 경보시스템과 커뮤니케이션 대응 절차가 사전에 수립되어 관리되었다.

이 사례연구에서는 DHMB프로젝트의 미소진동 안전관리시스템을 살펴보고 프로젝트 실패사례를 분석함으로써 EGS지열발전 프로젝트의 seismic risk 관리를 위하여 개선해야 할 미소진동 안전관리시스템에 대한 사후 권고안을 살펴보기로 한다.

2. Basel EGS 프로젝트의 개요

바젤 지열발전 프로젝트는 EGS 기술로 개발한 심부 지열에너지를 이용하여 바젤 지역의 전력공급과 지역

난방을 하기위한 열병합발전 프로젝트로 계획되어 추진되었다. 프로젝트 개발사인 GEL사는 2001년 탐사공 Otterbach 2의 기술보고서 작성으로부터 프로젝트 개발을 시작하였고 사업계획 수립과 IWB사 중심의 컨소시엄 구성이 완료된 2004년부터는 바젤지열발전회사(SPC)인 GeoPower Basel AG의 발주 하에 프로젝트의 기술적 진행을 총괄하였다.

바젤 EGS 지열발전 프로젝트의 개발 컨셉은 triplet system으로서 한 개의 주입공과 두 개의 생산공으로 설계되어 있다. 목표심도는 생산공과 주입공 모두 5,000 m로서 주입공에 90℃온도인 100 l/s의 물을 주입하고 두 개의 생산공에서 200℃온도인 50 l/s의 지열수를 각각 순환 생산하여 6 MWe의 전기와 17 MWth의 열을 생산하는 것을 목표로 하였는데, 이 경우 연간 31 GWe의 전기와 48 GWth의 열 생산이 가능할 것으로 계획되었다.

DHMB프로젝트는 Table 1에서 보는 바와 같이 전력 및 에너지회사와 주 정부기관 등 총 11개 기관이 참여하여 진행되었는데(Geopower Basel AG, 2007), 프로

Table 1. Participating partners of GeoPower Basel AG

참여기관명	투자액
IWB (Industrielle Werke Basel, 바젤 에너지회사)	20.0M CHF
Elektra Baselland (EBL, 바젤 전력회사)	9.4M CHF
Axpo (다국적 에너지기업, 자회사 NOK와 CKW로 참여)	9.03M CHF
Amt für Umwelt und Energie des Kantons Basel-Stadt (바젤시주 환경·에너지부)	8.0M CHF (비상환 지원금)
Gasverbund Mittelland AG (바젤인근 가스회사)	4.67M CHF
Energiedienst Holding AG (바젤인근 독일 에너지 지주회사)	4.67M CHF
Amt für Umweltschutz und Energie Basel-Landschaft (바젤주 에너지·환경보호청)	3.2M CHF
ewz (Elektrizitätswerk der Stadt Zürich, 쥐리히 전력회사)	3.2M CHF
AET (Azienda Elettrica Ticinese, 스위스 남부지역 전력회사)	2.92M CHF
SIG (Services Industriels de Genève, 제네바주 산업청)	2.0M CHF
Geothermal Explorers Ltd (프로젝트 개발사)	0.8M CHF
총 투자액	67.89M CHF (약 798억원)

2) 바젤시의 종합 에너지회사

젝트 개발자인 Markus O. Häring 박사는 너무 많은 기관이 참여했기 때문에 효율적인 프로젝트 진행이 어려웠다고 밝히면서 지분참여기업은 위험분담이 가능한 3~5 개사 정도가 적당하다는 의견을 표명한 바 있다.

DHMB 프로젝트는 2005년 3월부터 약 1년 동안 모니터링 시스템 설치 및 테스트 등의 준비기간을 거쳐 2006년 4월 중순부터 시추를 시작하여 145일 만에 첫 번째 시추공인 Basel 1의 5,009 m 심도 시추에 성공하였고 200°C의 지열온도를 확인하였다. Fig. 1은 Basel 1의 well design과 시추추상도를 보여 주는데 Basel 1은 2,500 m 심도에서부터 기반암인 결정질 화강암이 존재하며 목표심도의 stimulation을 위하여 4,627 m까지 케이싱을 설치하였다(Markus O. Häring, GEL., 2006).

미소진동 계측을 위한 모니터링 시스템은 Fig. 2와 같이 바젤 1 시추공 주변 5 km반경 이내에 모두 6개의 monitoring well을 선정하고 3D seismometer를 설치하여 모니터링 네트워크를 구성하였는데 설치심도가 가장 깊은 관측공은 Otterbach2 공으로써 지하 2,745 m 심도의 결정암에 설치하였고 두 번째는 Riehen2 공으로 1,247 m 심도에 설치하였으며 나머지 관측공들은 325~553 m 심도의 4개공에 설치하였다(Markus O. Häring, GEL., 2006년). 총 6개의 monitoring well과 Basel 1 시추공의 지표지진계까지 모두 7개의 monitoring station에서 실시간으로 측정된 seismic data가 central server로 전송되어 분석에 이용된다. 바젤 EGS 프로젝트에서 설치한 monitoring system의 microseismic data는 SED(Swiss Seismological Service) 및 주정부에서 설치한 지표지진계에서 계측한 microseismic 정보와 함께 미소진동 안전관리시스템의 기준이 된다.

Basel 1은 목표심도 시추에 성공한 후에 well completion을 거쳐 Geothermal reservoir 형성을 위해 stimulation을 실시하였는데, 2006년 11월 23일부터 26일까지 최고 73.8 bar의 압력과 최대 9.94 l/min의 flow rate로 prestimulation을 성공적으로 실시하였다. 그 후 2006년 12월 2일부터는 main-stimulation을 실시하여 최고 296 bar의 압력과 최대 3,750 l/min의 flow rate로 주입하는 도중 12월 8일 진도 2.6의 지진이 관측되면서 미소진동 안전관리시스템에 따라 즉시 stimulation을 위한 flow rate와 well head pressure를 감소시켰으나 1시간 후에 진도 3.4의 지진이 추가로 발생함으로써 stimulation이 중지되고 예정되었던 Basel 2의 시추도 중단되었다.

그 후 바젤시 주변 인근 국가들인 스위스, 독일, 프랑스 3국의 관련 전문가로 구성된 SERIANEX (Trinational Seismic Risk Analysis Expert Group)에서 3년여의 조사를 거쳐 바젤 지열발전 프로젝트의 seismic risk를 측

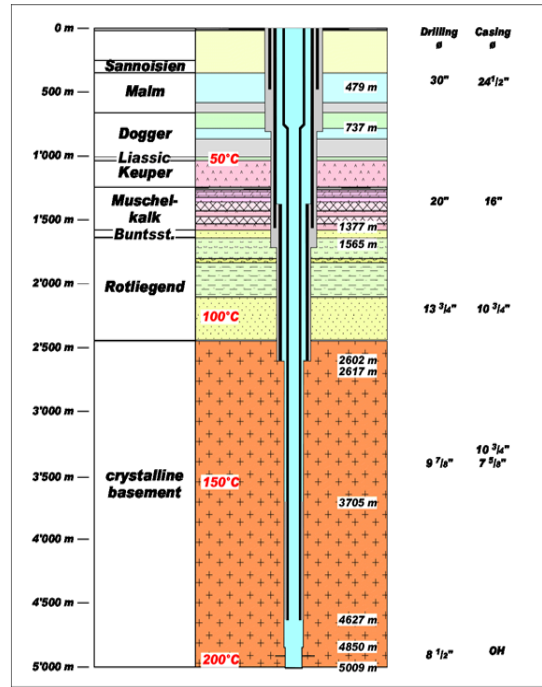


Fig. 1. Well Design of Basel 1

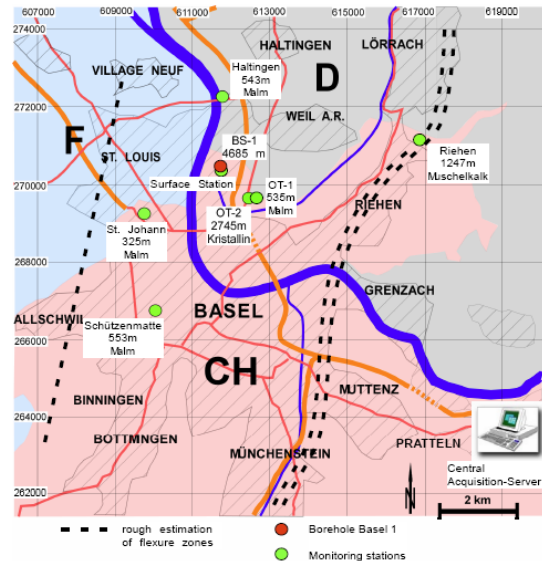


Fig. 2. Microseismic monitoring array

정한 결과 프로젝트를 계속 추진할 경우 바젤시 주변의 단층이 자극을 받음으로써 개발단계에서 30번(그 중 9 번은 진도 3.4 수준 또는 그 이상), 30년간의 운영기간에서 최소 14번에서 최대 170번에 이르는 지진이 발생

할 우려가 있으며 최대진도는 4.5의 가능성이 있는 것으로 예상되어 바젤 지열발전 프로젝트는 완전히 중단하는 것으로 결정되었다.

그러나 바젤주정부는 DHMB프로젝트의 중단 결정에 대하여 이는 Fig. 3에서 보는 바와 같은 바젤지역 인근

의 지질학적 특수성에 기인한 것으로 EGS 지열발전시스템의 문제가 아니라는 점을 명확하게 함으로써 스위스 다른 지역의 심부지열 프로젝트가 다수 진행될 수 있는 가능성을 열어놓았다(SERIANEX AP2000 Report, 2009).

### 3. 미소진동 안전관리 시스템

바젤시 인근 지역은 1356년에 리히터규모 6.5로 추정되는 대지진으로 인해 바젤시의 대부분이 파괴된 역사를 갖고 있는 지역으로서 EGS지열발전 프로젝트의 시작단계에서부터 stimulation과정에서 예상되는 microseismic event에 대해서 체계적인 위험관리 시스템을 수립하여 진행하였다.

바젤지열발전 프로젝트에서 수립되었던 microseismic safety management system을 살펴보면 SED(Swiss Seismological Service)와 주 감독관청에서 측정한 정보를 기준으로 Magnitude는 2.3미만에서부터 3.5초과까지의 5단계, PGV(Peak Ground Velocity)는 0.5 mm/s 미만에서부터 5.0 mm/s초과까지의 4단계, 대중의 진동감지는 아무도 알지 못하는 상태부터 일반적으로 대부분 인지하게 되는 단계까지의 5단계로 구분되어 관리되고 있다.

Magnitude 2.3 미만의 seismic event인 1단계 “green”에서는 일상적인 보고 하에 정상적으로 stimulation을

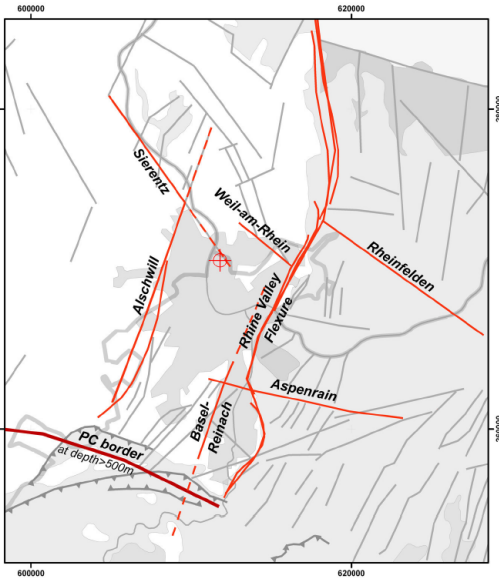


Fig. 3. Typical faults of nearby Basel EGS site

Table 2. Communication response procedures

Stage	A phase is defined when at least one of the three criteria applies				Measures					Communication			
	Magnitude	Peak ground velocity	Public perception	Permanent measures	Interruption	Pumping regime	Pressure regime	Monitoring system	Resume operations	Project team	Authorities / Institutions	Public	
	M <sub>L</sub>	mm/s											
1	"green"	< 2.3	< 0.5	none	none	regular operation	regular operation	regular operation	-	standard reporting	standard reporting	-	
2		> 2.3	0.5 ~ 2.0	few calls	permanent recording of injection pressure, draw down, pump rates, volumes, temperatures, regional seismicity, local microseismicity, surface vibrations near borehole	none	Continue pumping. Do not increase pump rate	Constant pressure	additional check of full operation of monitoring system		report to PL, PE, GF PL: Project Management PE: Project Development GF: Managing Director	adhoc operations meeting	Communiqué on website
3	"yellow"	< 2.9	> 2.0 ~ 5.0	some calls		Reduce injection pressure to 'Stimulation Pressure'	Pump at slow pump rate, or Stop Pumps, or Bleed off pressure	Maintain well head pressure below Surface Stimulation Pressure	check data recording, inform SES	Integrated seismic and hydraulic data interpretation, adjust operation parameters	alarm PL, PE, GF	operations meeting with SES and Kantonsgeologe	Communiqué on website
4		> 2.9	> 5.0	many calls		until cleared	stop pumping	bleed off excess pressure	check data recording, alarm SES	Integrated seismic and hydraulic data interpretation, reduce operation parameters; evaluate alternative frac-methods (eg acid frac)	alarm PL, PE, GF; inform board	operations meeting with SES and Kantonsgeologe	press release to media
5	"red"	> 3.5	general felt			until cleared	stop pumping	bleed off excess pressure	check data recording, alarm SES	Following review, board decision, permission by authorities	alarm PL, PE, GF; inform board	operations meeting with SES and Kantonsgeologe, Sicherheitsinspektorat	press conference and pressrelease to media

진행하지만 진도 2.3에서 3.5미만의 2,3,4단계인 “yellow”에서는 microseismic event response procedure에 따라 프로젝트 팀 및 감독관청에 대한 보고와 주민들에게 관련정보를 웹페이지와 SED경보시스템을 통해 언론에 공표하는 동시에 현장에서는 압력과 유량을 즉시 조절하고 모니터링을 강화하도록 매뉴얼화 되어 있다. 그리고 진도 3.5를 초과하는 5단계 “red”에서는 모든 stimulation 활동을 중단하고 프로젝트 팀 및 감독관청과 회의를 진행하며 즉시 언론과의 conference를 개최하고 보도자료 배부를 통해 일반 대중에게 공표한다. Table 2는 단계별 현장 매뉴얼 및 커뮤니케이션 대응을 정리해서 보여 준다(Bob Worrall, GEL., 2006).

바젤 지열발전 프로젝트의 microseismic safety management system은 2005년 9월의 Advisory Board 회의에서 micro-seismic monitoring과 seismic hazard에 관해 논의하던 중 GEL사의 Bob Worrall에 의해 제안되어 엘살바도르의 베를린 프로젝트에 적용하였던 traffic light system을 기초로 하여 작성되었다.

이 시스템에서 가장 중요한 요소는 대중에 대한 커뮤니케이션이라고 지적하였으며 학교에서의 설명회와 SED의 프로젝트참여 등을 비롯한 영국 콘월과 엘살바도르에서의 긍정적인 경험을 적극 활용할 것을 권고하고 있다. (Markus O. Häring, GEL., Minutes on Advisory

Board Meeting, 2005)

GEL사에 의해 수립된 microseismic safety management system은 원형이었던 엘살바도르 베를린 프로젝트의 traffic light system에서의 기준치인 진도 4.4와 PGV 100 mm/s와 비교하면 훨씬 낮은 기준치를 적용하고 있는데 그 이유는 엘살바도르와 달리 바젤 지열발전 프로젝트는 도심에서 진행되는 프로젝트이기 때문에 엄격한 미소진동 기준치를 적용하였으며, 스위스 시추인허가 기준이 엘살바도르보다 엄격하게 규제되고 있기 때문이다. (Markus O. Häring, GEL., Workshop on Seismic Event of Dec 8 and Way Ahead, 2006)

stimulation과정에서 microseismic event가 발생하면 5단계로 구분된 각 기준에 따라서 현장에서의 대응과 보고하는 절차는 Fig. 4와 같은데 green, yellow, red의 상황에 맞는 대응체계에 따라 프로젝트 현장책임자인 Markus O. Häring박사를 중심으로 순서도의 흐름으로 대응한다(Markus O. Häring, GEL., 2005).

microseismic event가 발생하여 민원이 폭주하게 되면 각 단계별 대응 매뉴얼과 보고체계를 만들어 놓지 않았을 경우 많은 혼란이 발생하게 되고 효과적인 초기 대응에 실패할 확률이 높아진다. 바젤 지열발전 프로젝트는 각 단계별로 효과적인 대응과 현장 운영을 위해 각 단계별 seismicity information flow를 수립하여 체

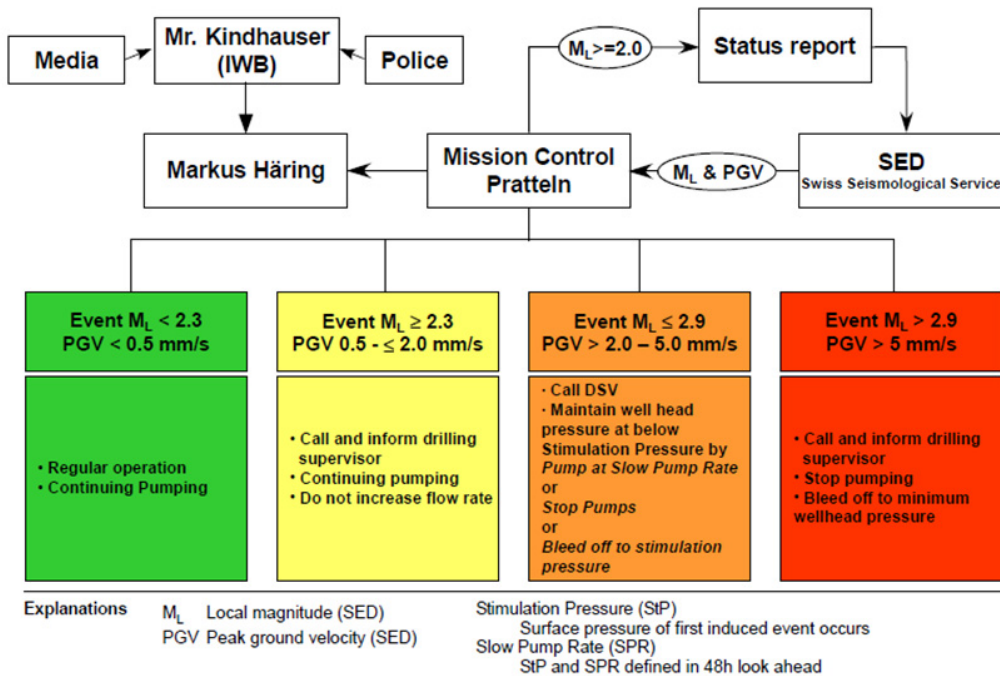


Fig. 4. Microseismic event response procedure

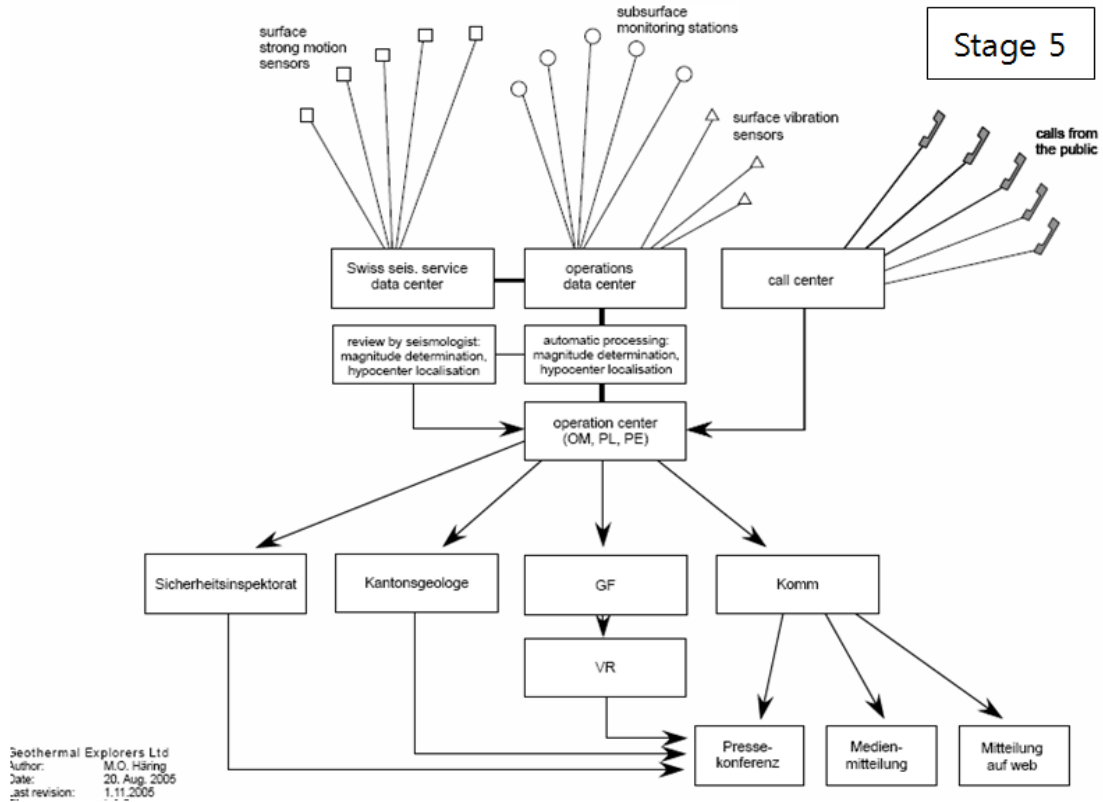


Fig. 5. Seismicity information flow

계적인 정보 취합과 보고를 통해 적절한 조치를 취할 수 있는 시스템을 각 단계별로 구축해 놓았는데 Fig. 5에서는 대응시스템의 마지막 단계인 5단계 “Red”의 seismicity 정보 흐름도를 보여준다(Markus O. Häring, GEL., 2005)

바젤 EGS지열발전 프로젝트에서 적용된 microseismic safety management system은 적절하게 운영되었다는 점이 사고 후에 인정되면서 Geopower사와 프로젝트 개발사인 GEL사는 2006년 12월 8일의 진도 3.4 지진 유발에 대한 사법적 책임을 면하기는 하였으나 결과적으로 big event를 예측하거나 방지하지 못하고 프로젝트가 중단되는 최악의 상황을 맞이했다는 점에서 완벽한 미소진동 위험관리시스템 수립은 앞으로의 과제라고 할 수 있겠다.

EGS 지열발전 기술에 있어서 매우 중요한 stimulation은 필연적으로 induced seismic event를 유발하게 되는데 완벽한 모니터링 시스템을 갖추고 event 발생 즉시 상황별 대응 매뉴얼에 따라 pumping 압력을 줄이거나 flow rate를 즉시 감소시키는 적절한 조치를 취했다고

해도 조치 사후에 발생한 미리 예측하지 못했던 post-injection seismicity 현상에 대해서는 완벽한 통제가 어려울 수밖에 없는 현실에서 DHMB프로젝트의 사례는 EGS프로젝트 후발주자에게 많은 교훈과 시사점을 주고 있다.

#### 4. 바젤EGS Project의 교훈과 과제

바젤 EGS 프로젝트는 바젤시에 전력뿐만 아니라 난방열을 동시에 공급하는 열병합발전 프로젝트로 출범함에 따라 에너지 이용효율을 극대화하기 위한 방안으로 project company인 GeoPower사의 대주주인 IWB의 송전 및 열공급 인프라를 이용하기 위해 Fig. 6에서 보는 바와 같이 EGS프로젝트 최초로 거주지 인근 도심에서 진행되었는데 주변 아파트와의 거리는 불과 80 m 밖에 떨어지지 않았다(GEL., 2006). 또한, IWB의 열병합발전소 주차장 부지에서 프로젝트를 진행됨에 따라 열병합발전소의 LNG연료탱크가 적치되어 있는 장소 바로 옆에서 시추와 stimulation이 진행되는 등 EGS지



Fig. 6. Location circumstance of Basel EGS drilling site (pic. : GEL, 2006(up), INNOGEO Technologies, 2007(down))

열발전 프로젝트 입지의 무리한 선정이 microseismic event에 따른 주민들의 체감피해를 더욱 크게 하는 결과를 맞이하게 되었다.

지열발전이 친환경적인 에너지 이용기술이라고 하더라도 프로젝트 진행과정에서 발생하는 microseismic event에 따른 주민들의 피해 우려로 인한 반대여론이 크게 일어난다면 순조로운 프로젝트 진행은 기대하기 어려울 것이다. 실제로 DHMB 프로젝트의 개발자인 Markus O. Häring박사도 프로젝트 진행에 있어서 기술적인 고려 못지않게 민원이나 인허가와 같은 정치적인 고려사항이 더욱 중요하며 프로젝트 진행과정 동안 지속적인 커뮤니케이션의 중요성에 대하여 뒤늦게 깨달았다고 아쉬워한 바 있다. 때문에 최근 진행하는 스위스 심부지열개발 프로젝트는 지역주민의 동의를 얻어서 진행하는 방식이 일반화되고 있다.

바젤 지열발전 프로젝트는 오랜 기간의 준비와 충분한 사전 홍보를 통해 진행되었고 stimulation을 위한 hydraulic operation의 결과로 발생할 microseismic event에 관해서도 사전에 충분히 숙지하였을 뿐만 아니라, reservoir monitoring 및 미소진동 경보시스템(traffic light

system)을 통한 risk mitigation strategy를 수립하여 적용하였다. 그럼에도 불구하고 stimulation 후 진도 3이상의 seismic event가 발생하면서 지역주민과 언론 등 community의 불신을 초래하게 되었고 약 3년간에 걸친 다각도의 조사 결과에 따라 DHMB프로젝트는 2009년에 최종적으로 중단을 결정하였다.

GEL사의 Markus Häring박사는 EGS 프로젝트가 성공적으로 착수되었다고 해도 향후 진행과정에서 발생하는 문제에 대한 지역커뮤니티와의 지속적인 커뮤니케이션이 필요하며, 이 문제는 기술적 난관을 해결하는 것 못지않게 중요하다고 강조한다. 또한 프로젝트 입지 선정에 있어서도 부지 확보의 편의성과 경제적 효율만을 중시하고 그로 인해 발생할 위험에 대한 가능성을 과소평가한 결과 바젤 EGS프로젝트는 중단이라는 최악의 결과를 초래하게 되었다.

진도 3.4의 seismic event에 의한 프로젝트의 잠정 중단 후 바젤 주정부는 SERIANEX에 의뢰한 추가적인 seismic risk의 분석을 통해서 프로젝트의 계속 여부를 최종 결정하는데 결정적인 역할을 하였다.

SERIANEX는 총 7개의 보고서를 제출하였는데 AP 7000보고서는 바젤 EGS 지열발전 프로젝트에 대한 seismic risk 분석의 마지막 작업으로서 첫 번째 risk mitigation strategies에서는 지열저류층의 크기에 초점을 맞춘 저류층 설계와 저류층 실시간 모니터링, 그리고 미소진동 경보시스템에 대한 수정 권고를 하고 있으며, 두 번째는 DHM프로젝트의 감독기관인 바젤 주정부에 수용가능한 위험을 기반으로 향후의 대응방안에 맞춘 가상시나리오를 제시하여 프로젝트의 진행 또는 중단할 경우에 관한 대안을 제시하는 두가지 권고안으로 되어 있다.

우선 위험경감전략은 시스템설계와 실시간 모니터링 두가지로 구분되며 가상시나리오는 원래의 컨셉으로 진행되는 시나리오와 대체컨셉 이용 시나리오, 마지막으로 중단하는 시나리오 세가지로 구성되어 있다.

위험경감전략의 첫 번째인 시스템설계에서는 모두 세 가지 방안을 권고하고 있는데 첫 번째는 순환율을 감소시키는 것이다. 바젤 EGS 프로젝트 컨셉인 50 l/s의 순환율로 1년동안 순환시키게 되면 최대 진도 3.3의 미소지진이 발생하지만 10 l/s의 순환율로 1년 동안 순환할 경우에는 미소지진이 발생하지 않는다는 시뮬레이션 결과를 통해 순환율을 낮출 것을 권고하고 있다.

두 번째는 multi-fracture 시스템을 권고하고 있는데 seismic risk 경감을 위하여 저류층 크기나 순환율을 축소한 결과로 프로젝트의 경제성을 확보하는 것이 어렵기 때문에 Fig. 7과 같이 호주의 Cooper Basin에서

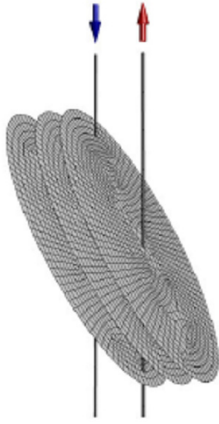


Fig. 7. 3-level multi-fracture system

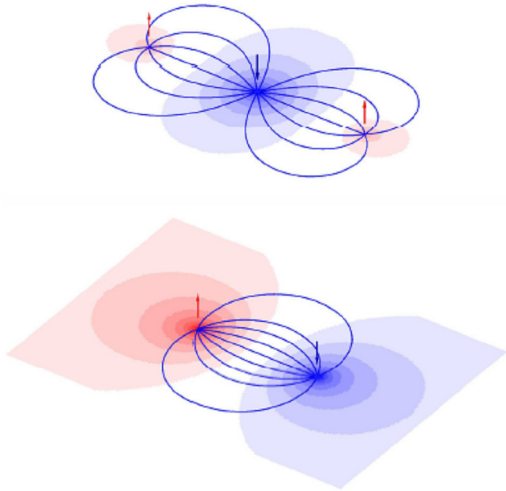


Fig. 8. Pressure distribution model of a triplet & a doublet system

Geodynamics사가 진행하는 EGS프로젝트의 사례처럼 작은 규모의 지열저류층 여러 개를 연결하는 multi-fracture시스템을 통해 상용화에 필요한 대규모 지열저류층을 확보할 것을 권고하고 있다(Stefan & Robert, SERIANEX AP7000 Report, 2009).

세번째는 Fig. 8의 붉은색으로 표시된 생산공의 압력 분산 모형에서 볼 수 있는 바와 같이 triplet system보다 한개의 주입공과 한개의 생산공으로 이루어진 doublet 시스템이 훨씬 더 큰 압력을 받고 있으며, 한개의 주입공과 두개의 생산공으로 이루어진 triplet 시스템은 압력 레벨과 확산의 조절에 따라 훨씬 낮은 압력으로 같은 양의 지열수 순환이 가능하다고 권고하면서, 시물레

이션 결과 365일동안 50 l/s의 지열수를 순환시켜도 seismicity 발생이 없었다고 보고하고 있다(Stefan & Robert, SERIANEX AP7000 Report, 2009).

그러나 이런 권고안은 오직 미소진동의 경감에만 초점을 맞추고 있을 뿐 프로젝트의 경제적 타당성이나 기술적 타당성의 입증까지는 조사내용의 범위를 벗어나기 때문에 하지 않았다고 밝히고 있어서 상용화 EGS 프로젝트의 적용까지에는 많은 한계를 보여주고 있다는 문제점이 있다.

위험경감전략의 두 번째인 real-time monitoring에서는 첫 번째로는 앞으로 수행할 저류층 stimulation 중에는 hydraulic reservoir response를 실시간으로 모니터링하면서 지열저류층의 정압 경계(constant pressure boundary) 조짐이 보일 경우 수리자극 활동을 중지해야 한다고 권고한다. 두 번째로 induced seismicity에 대한 실시간 모니터링을 권고하면서 DHMB의 “traffic light system”은 고정되어 있는 실시간 모니터링으로서 2006년 12월 8일의 최초 진도 2.6의 event 발생 당시 경보시스템 매뉴얼대로 즉각 조치를 취했으나 1시간 만에 진도 3.4의 지진이 발생하는 것을 방지하지 못함으로써 실패하였다고 지적하였다.

AP3000 보고서의 조사 분석에 따르면 stimulation을 위한 주입을 마친 후에도 지열저류층에서 수압확산이 계속 일어나는 post-injection seismicity현상으로 인해 hydraulic stimulation을 실시한 프로젝트 대부분에서 stimulation 당시의 지진규모보다 post-injection 지진규모가 더 크게 나타났으며 특히 바젤 EGS 프로젝트의 경우에는 규모 차이가 0.8로서 가장 큰 차이를 나타냈다(Stefan & Robert, SERIANEX AP3000 Report, 2009). 이에 따라 AP7000보고서는 앞으로의 induced seismicity에 대한 실시간 모니터링은 post-injection 규모를 감안한 사전경보시스템으로 대체하여 조기 대처함으로써 위험 관리 기준을 벗어나는 microseismic risk 제어를 할 것을 권고하고 있다.

바젤 EGS 프로젝트의 3가지 가상시나리오에 따르면 첫째 기존 컨셉으로 진행할 경우 최대 진도 4.1의 지진 발생 가능성과 35 M CHF(스위스프랑)~ 300 M CHF의 비용 발생 가능성을 예상하고 있고 30년간의 순환기간에도 170 M CHF의 경제적 손실이 발생할 가능성이 있는 것으로 평가하였고, 둘째 수정 컨셉으로 프로젝트를 진행할 경우에는 순환율을 감소하고 multi-fracture system 그리고 triplet system 적용을 권고하였고 셋째 방안은 프로젝트를 중단하고 최소 몇년간 seismic monitoring system을 운영할 것을 권고하고 있는데 첫째와 둘째 방안은 경제적 타당성이 없기 때문에 세 번



째 권고안에 따라 바젤 EGS 프로젝트는 2009년 말에 최종 중단을 결정하였다.

## 5. 결론

DHMB 프로젝트의 실패 사례는 전 세계 EGS 지열발전 프로젝트의 상용화 진행에 많은 어려움을 남겨 준 대신에 많은 교훈과 데이터를 제공하여 보다 완성도 높은 EGS 지열발전 프로젝트 컨셉을 개발하는데 도움을 주었다. 우리나라에서 진행하고 있는 포항 EGS 지열발전 프로젝트 또한 바젤 EGS 지열발전 프로젝트의 실패 사례를 교훈삼아 seismic risk의 초기 대응에 보다 효과적인 microseismic safety management system을 개발하여 적용함으로써 성공적으로 프로젝트를 완성해 나갈 필요가 있다.

전 세계 EGS 지열발전 프로젝트는 상용화를 위한 경제성 확보와 risk mitigation 전략 사이에서 양쪽을 모두 만족시키는 기술 및 전략을 개발해야 하는 과제를 안고 있다. 우리나라의 포항 EGS 지열발전 프로젝트도 경제성이 있는 project 위험관리전략을 수립함으로써

EGS 지열발전소 건설 및 운영에 성공하고 세계적인 기술경쟁력을 확보해 나가길 기대한다.

## References

1. Markus O. Häring, Geothermal Explorers LTD, 2006, Projekt Deep Heat Mining Basel, Anlage 2~4, 24, 25, 28, Switzerland, 1-4, 48-52.
2. Bob Worrall, Florentin Ladner, 2006, Basel1 Cleanout and Stimulation Programme, Switzerland, Geothermal Explorers LTD, 42-44, 79-80, 92-98.
3. Geopower Basel AG, 2006, Deep Heat Mining, Geothermie: Energie aus der Erde, Switzerland, 14p.
4. Geopower Basel AG, 2007, Jahresbericht, Switzerland, 5p.
5. Stefan Baisch, David Carbon, et al., 2009, Deep Heat Mining Basel Seismic Risk Analysis, SERIANEX (Trinational Seismic Risk Analysis Expert Group), Basel-Stadt, 9-16.
6. Stefan Baisch, Robert Vörös, 2009, AP3000 Report "Induced Seismicity", Basel-Stadt, Q-con GmbH, 27-48.
7. Stefan Baisch, Robert Vörös, 2009, AP7000 Report "Recommendations", Basel-Stadt, Q-con GmbH, 5-19.

### 이 상 돈



1990년 서울시립대학교 경상대학 회계학과 경영학사  
2007년 휴스콘건설 친환경에너지사업본부장(전)  
2008년 이노지오테크놀로지 대표이사(현)  
2011년 한국지열에너지학회 사업이사(현)

Tel: 010-8533-7507

E-mail: lsd9474@gmail.com

현재 (주)이노지오테크놀로지 대표이사