

감 사 원

주 의 요 구

제 목 규모 3.1 등 지진 발생 이후 대응조치 부실

소 관 기 관 산업통상자원부

조 치 기 관 산업통상자원부

내 용

< 국민 및 공익감사청구사항 >

- 산업부와 에기평, ☆☆ 컨소시엄은 유발지진 발생 사실을 포항시민에게 알리지 않고 경주 지진의 여진이라고 생각하도록 기망하고, 규모 3.1 지진 이후 추가 지진의 위험성을 확인하고, 안전성을 확보할 수 있는 기회가 있었음에도 적절한 조치 미 실시

☆☆와 산업부, 에기평은 수리자극 과정에서, 특히 규모 3.1 지진 발생 이후 추가 지진에 대한 위험성을 확인하고, 안전성을 확보할 수 있는 기회가 있었음에도 적절한 조치를 하지 않았다는 주장이 이번 감사청구에서 제기되어 이와 관련한 사실관계를 확인하였다.

1. ☆☆의 규모 3.1 지진 발생 이후 대응조치 부적정

☆☆ 컨소시엄과 에기평이 체결한 협약서¹⁾ 제3조에 따르면 기술개발 참여자들은 「기술혁신사업 운영요령」 등의 규정과 사업계획서에 근거하여 기술개발을 성실히 수행하도록 되어 있고, 「기술혁신사업 운영요령」 제11조에 따르면 주관기관인 ☆☆는 과제 수행에 대한 종합적인 관리를 하도록 되어 있다.

그리고 「기술혁신사업 운영요령」 제44조에 따르면 에기평은 과제 수행이 극

1) 2010. 12. 20. 1단계 협약을 체결하였고, 2012. 12. 21. 2단계 협약을 체결하였음

히 불량 또는 연구개발의 결과가 극히 미흡하여 평가에 따라 중단 또는 불성실 수행으로 결정된 경우 등에는 귀책사유에 따라 사업에 참여하는 기관, 기업 또는 소속 임직원 등에 대하여 5년 이내의 범위에서 국가연구개발사업의 신규 참여를 제한할 수 있고, 이미 지급한 출연금의 전부 또는 일부를 환수할 수 있도록 되어 있다.

☆☆ 컨소시엄은 [표 19]와 같이 2017. 3. 16.부터 같은 해 4. 14.까지 PX-2에 3차 수리자금을 실시하였고, 같은 해 4. 15. 신호등체계의 최고 등급에 해당하는 규모 3.1 지진이 발생하자 예기평(4. 15., 4. 17.) 및 산업부(4. 17.)에 지진발생 보고를 하였다.

[표 19] 지진발생 보고 등 주요 사건일지

일자	주요 사건
2016년 1~2월	· ☆☆, PX-2에 1차 수리자금(1. 29.~2. 18.)
2016년 12월	· ☆☆, PX-1에 2차 수리자금(12. 15.~12. 28.) · 포항에서 규모 2.2 지진 발생(12. 23.) · 포항에서 규모 2.3 지진 발생(12. 29.)
2017년 3~4월	· ☆☆, PX-2에 3차 수리자금(3. 16.~4. 14.) · 포항에서 규모 3.1 지진 발생(4. 15.) · ☆☆, 예기평에 규모 3.1 지진 발생 사실 2차례 보고(4.15., 4.17.) · 예기평, 산업부에 규모 3.1 지진 발생 사실 보고(4. 17.)
2017년 5~6월	· ☆☆, 예기평에 과제수행기간(6개월) 연장승인 요청(5. 22.) · 예기평, ☆☆의 과제수행기간 연장 요청 승인(6. 5.) · 서울대, 포츠담에서 유럽 ♥♥팀과 포항 규모 3.1 지진 관련 회의(6. 15.) · 유럽 ♥♥팀, 포항 상황에 대한 권고사항 제시(6. 23.)
2017년 8~9월	· ☆☆ 컨소시엄, 유럽 ♥♥팀과 포항에서 4차 수리자금 전 회의(8. 3.) · ☆☆ 컨소시엄, 유럽 ♥♥팀과 함께 PX-1에 4차 수리자금(8. 7.~8. 14.) · ♥♥팀 4차 수리자금 결과 권고사항 제시(8. 22.) · ☆☆, PX-2에 5차 수리자금(8. 30.~9. 18.)
2017년 11월	· 포항에서 규모 5.4 지진 발생(11. 15.)

자료: ☆☆ 제출자료 재구성

가. 규모 3.1 지진 발생 보고 부실

☆☆ 컨소시엄(참여기관 ♡♡)이 수행한 “Basel EGS Project의 미소진동관리 사례연구”²⁾(2013년 12월)에서 바젤 사례³⁾의 경우 “진도 3.4의 지진활동(seismic event)에 의한 프로젝트 잠정 중단 후 바젤 주정부는 SERIANEX에 의뢰한 추가적인 지진위험(seismic risk)의 분석을 통해서 프로젝트의 계속 여부를 최종 결정하는 데 결정적인 역할을 하였다”라고 언급하고 있고, 위 컨소시엄(참여기관 서울대학교)이 수립한 “포항 EGS 프로젝트 미소진동 관리방안”(2015년 12월) 보고서에서도 2006년 스위스 바젤 심부지열개발 프로젝트 중 규모 3.4의 지진이 발생하여 프로젝트가 중단된 사례, 2013년 7월 스위스 장크트갈렌(St. Gallen) 지열발전 프로젝트의 경우 규모 3.5의 지진이 발생한 이후 프로젝트가 중단된 사례⁴⁾ 등이 기재되어 있는 등 규모 3.0 이상의 지진이 발생하면 EGS 사업을 중단하고 지진 위험도 분석을 하는 등 정부의 역할을 제시한 사례들을 서술한 바 있다.

한편 ☆☆ 컨소시엄은 예기평에 2017. 4. 15. 규모 3.1 지진 발생 당일 [별표 6] “규모 3.1 지진 발생 보고(☆☆→예기평)”와 같이 이메일로 ‘당시 주입(수리자극)을 하고 있지 않았던 점과 우리 현장 지열정의 심도보다 훨씬 깊은 지점에서 지진이 발생했다는 점 등을 고려해 볼 때 현장 주입 작업과의 연관성은 보다 깊은 분석이 필요할 것으로 생각된다’는 내용으로 지진 발생 사실을 보고하였다.

2) ☆☆ 컨소시엄의 ♡♡ 대표이사 R이 작성. ☆☆ 컨소시엄은 2013. 11. 30. 2단계 1차연도 연차보고서에 해당 논문을 기술개발결과에 따른 논문실적으로 제출

3) 스위스 바젤의 경우 2006년 지열발전 중 규모 3.4의 지진이 발생한 이후 지열발전 프로젝트가 잠정 중단되었다가 전문가 그룹을 구성하여 지열프로젝트의 지속 여부를 판단하기 위한 위험 분석(risk analysis)을 실시한 이후 사업을 계속 추진할 경우 최대 규모 4.5의 지진이 발생할 것으로 예측되어 2009년 완전 중단됨

4) 위 보고서는 장크트갈렌(St. Gallen) 프로젝트가 중단 후 재개된 것만 언급하였으나, 이후 스위스 지진국(SED: Swiss seismological service)의 분석 결과 유량 부족, 지진 위험, 메탄가스 위험 등의 문제로 2014년 봄에 사업이 종료됨.[대한지질학회 연구용역보고서, “Good Practice” Guide for Managing Induced Seismicity in Deep Geothermal Energy Projects in Switzerland(SED, 2017년 10월)]

이후 지자연, 서울대학교 등 ☆☆ 컨소시엄 연구책임자들이 지진 발생 보고 (이메일) 다음 날인 4. 16. 회의⁵⁾를 한 결과, 규모 3.1의 지진이 지열발전에 따른 유발지진일 가능성이 높은 것으로 판단하였고, 예기평 및 산업부에 이를 정식 공문으로 보고⁶⁾하기로 결정하였으며 이 회의에서 서울대학교 B 교수는 ‘전날인 4. 15. 예기평에 보고한 메일 내용은 물 주입에 의한 지진일 수 있다는 사실을 명시적으로 언급하지 않아 예기평에 주입에 의한 유발지진일 가능성이 높다는 것을 설명해야 한다’고 주장하였다.

따라서 ☆☆가 2017. 4. 17. 규모 3.1 지진 발생을 예기평과 산업부에 공문으로 보고할 때에는 산업부와 예기평이 지진 위험성을 충분히 인지하고 대응할 수 있도록 규모 3.1 지진 발생이 지열발전으로 인한 유발지진일 가능성이 높다는 사실을 명확하게 언급하는 것이 바람직했다.

그런데 ☆☆는 [별표 6] “규모 3.1 지진 발생 보고”와 같이 2017. 4. 17. 예기평, 산업부에 보낸 공문에 포항 지열발전 과제로 인해 규모 3.1의 지진이 발생했을 가능성이 높다는 내용을 명시하지 않았다.

나. 새로운 위치에서 발생한 규모 3.1 지진 등에 대한 분석 미실시

“MW급 상용화 과제” 참여연구원인 E(지자연) 등이 2012년 작성한 논문⁷⁾과

5) ☆☆ 컨소시엄은 2017. 4. 15. 규모 3.1 지진이 발생하자 ☆☆, 지자연, 한국건설기술연구원, 서울대학교, ♀♀ 연구책임자가 참석하는 회의를 개최

6) 감사원 감사기간 중 ☆☆ 대표이사 K는 포항시에 규모 3.1 지진 발생 보고를 하였다고 주장. 이에 감사기간 중 확인한 결과 포항시에 직접 지진 발생 보고를 하였다는 ☆☆ V 이사는 2017. 4. 24. 포항시 ▲과 팀장 AH와 포항시청을 방문하겠다고 주고받은 문자메시지 내용을 제시하며 당일 AH 팀장을 시청 사무실에서 만났고, 구두로 규모 3.1 지진 발생 보고를 하였으며 포항시에 지진 발생 피해가 없는지 묻자 AH 팀장이 포항시에 지진피해가 없다고 답변하였다고 진술. 그러나 포항시 ▲과 팀장 AH는 감사원 조사 시 ☆☆ V 이사로부터 규모 3.1 지진 발생 보고를 받은 바 없고, 2017. 4. 24. V 이사가 보낸 메시지에는 ■■ 주식회사 사장 AI(☆☆ 이사 겸임)가 포항에 내려오게 되어 인사차 방문하겠다고 되어 있는데 규모 3.1 지진 발생 보고를 하였다는 것은 정황상 말이 되지 않는다고 주장. 또한 ■■ 주식회사 사장 AI는 2017. 4. 24. 포항시를 방문하거나 V 이사가 지진 발생 보고한 것에 대해 기억나지 않는다고 진술. ☆☆ V 이사와 포항시 AH 팀장의 주장이 상반되고, 지진 발생 보고 공문 등 포항시가 지진 발생 보고를 받았다는 객관적인 자료가 추가로 존재하지 않아 포항시가 ☆☆로부터 규모 3.1 지진 발생 보고를 받았다고 단정하기 어려움

7) 「지열 저류층 모니터링을 위한 시추공 가속도계 방식 미소진동 관측망 구축」(2012), E 등

2015년 5월 ☆☆ 컨소시엄이 작성한 연차보고서(2단계 2차연도)등에 따르면 수리 자극 시에 발생 및 전파해 나가는 균열의 위치 및 크기를 실시간으로 파악함으로써 지열 저류층의 상황을 정확히 규명하기 위하여 미소지진을 관측한다고 되어 있다.

한편, ☆☆는 2013년 10월 PX-1 시추 과정에서 드릴파이프 절단 사고 후 복구에 실패하자 2014년 6월경 PX-1 복구를 일단 보류하고 PX-2를 먼저 시추하기로 계획을 변경하였고 2015년 4월부터 PX-2를 시추하던 중 지하 3,800m와 4,200m 지점에서 이수(mud)가 대량으로 누출되어 기존에 알려지지 않은 파쇄대(추정 단층)가 2개 있는 것으로 예상하였다.

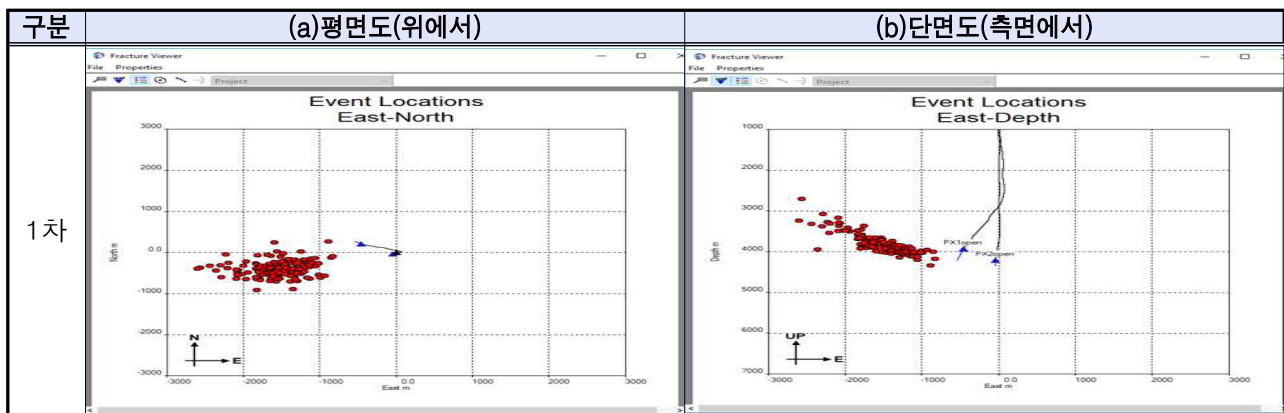
또한 ☆☆는 2015. 12. 9. PX-2 시추를 완료하고, 2016. 1. 29.부터 같은 해 2. 18.까지 PX-2에 물을 주입하는 1차 수리자극을 실시한 결과 [그림 15]와 같이 유발지진 분포가 나타나자 유발지진 분포방향으로 PX-1 시추를 실시하여 2016. 11. 13. 양 시추공의 시추를 완료한 후, 파쇄대 내부에 연결통로를 만들기 위해 2016. 12. 15.부터 같은 해 12. 28.까지 PX-1에 물을 주입하는 2차 수리자극을 실시한 결과 [그림 15]와 같이 초기 유발지진 분포가 나타나자 위 컨소시엄은 위 파쇄대(추정단층)가 PX-1과 PX-2 사이에 연결통로로 작용하고 있다고 판단하였다.

따라서, ☆☆는 3차 수리자극 이후 유발지진 발생위치와 크기를 파악하고 이러한 유발지진 발생위치와 크기 등 발생분포가 1·2차 수리자극과 다를 경우 이에 대한 원인을 분석하여 지열저류층의 상황을 정확히 규명하여야 했다.

그러나 지자연은 3차 수리자극 후 유발지진을 분석한 결과, [그림 16]과 같이 3차 수리자극에 따른 규모 3.1의 지진 및 미소진동 분포 양상이 기존 1·2차

수리자극 후에 발생한 미소진동의 발생 위치와 달리 PX-1와 PX-2의 연결선상이 아닌 PX-1 좌측 하단부에 위치하는 것으로 분석되어 자신들이 예상했던 파쇄대(추정단층)의 위치와 방향이 아니라고 생각하였고,⁸⁾ 이러한 내용을 컨소시엄에 전달하였으나 컨소시엄은 규모 3.1 지진 등이 1·2차 수리자극 시 발생한 유발지진의 위치와 다른 이유를 분석⁹⁾하지 아니하였다¹⁰⁾.

[그림 15] 1차 및 2차 수리자극 시 유발지진 발생 위치(2016. 6. 16., 2017. 2. 23. 해석)

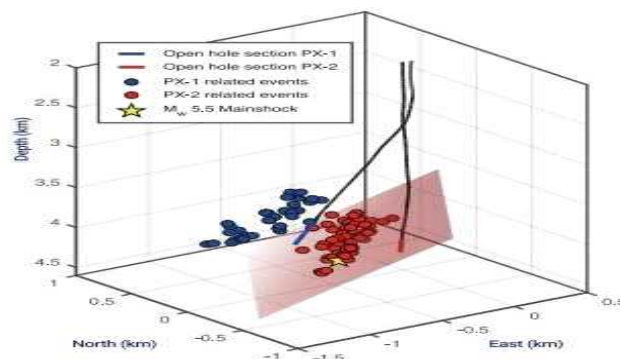


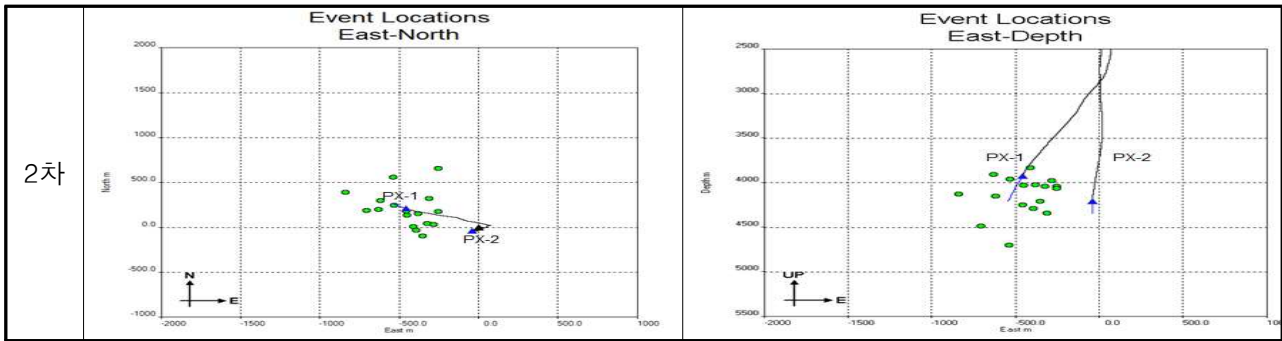
8) 2017. 4. 24. 분석한 미소진동 분포자료가 컨소시엄 내에서 공유된 이후 지자연 E 박사는 규모 3.1 지진 후 미소진동의 분포방향은 기존과 다르고 새로운 파쇄대면이 있을 수 있다는 것을 ☆☆에 전달하였고 2017. 6. 28. 과제 실무회의에서도 논의하였다고 진술하였으며, 이와 관련하여 ☆☆ K 대표는 미소진동의 분포가 기존과 다른 양상이라고 지자연으로부터 들었지만 새로운 단층이 있다고 들은 기억은 없다고 진술하고 있으며, 서울대학교 B 교수는 3.1 지진의 위치가 1·2차 수리자극 시 파악한 단층대와 떨어져 있어서 의아해했으나, 새로운 단층을 조사하기보다는 1·2차 수리자극에 따른 미소진동 자료의 재해석, 규모 3.1 지진의 위치, 기존 양산단층과의 거리 등의 논의에 초점을 맞추었던 것으로 기억한다고 진술

9) 시추공 탄성과 탐사 등으로 단층의 규모나 방향 파악이 가능

10) 지자연 E 박사는 규모 5.4의 지진이 일어난 후에야 규모 3.1의 지진이 일어난 단층이 규모 5.4의 지진을 일으킨 단층과 같은 면이고, 이 단층이 정부조사단 연구 결과와 같이 PX-1과 PX-2 사이를 지나가는 것을 알았다고 진술

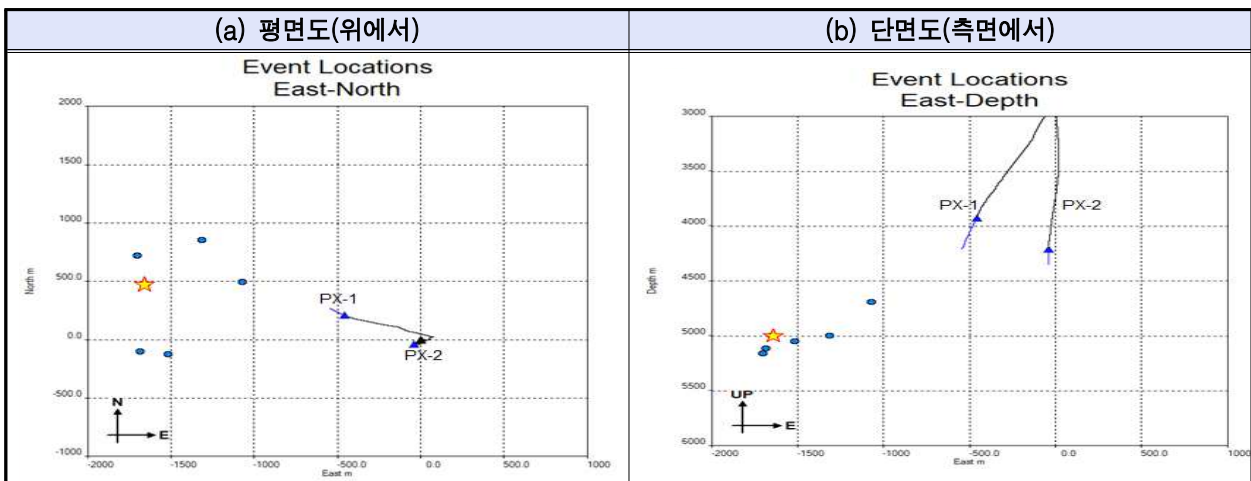
정부조사연구단이 분석한 규모 3.1 및 규모 5.4 지진의 단층면





- 주: 1. PX-2 시추 후 1차 수리자극을 실시하여 붉은 점이 찍힌 방향으로 PX-1을 시추
 2. ☆☆ 컨소시엄은 PX-1과 PX-2 사이에 유발지진(녹색 원) 위치가 분포하고 있으므로 양 시추공 사이에 연결통로가 생성되고 있는 것으로 해석, 왼쪽 그림에서 PX-1과 PX-2를 연결하는 선은 PX-1 우회시추(사이드 트래킹)을 한 시추공을 의미, 각 시추공 끝에 파란색 삼각형 밑에 푸른색 선은 나공(open hole) 지점임
 자료: 지자연 제출자료 재구성

[그림 16] 규모 3.1 지진 등 유발지진 발생 위치(2017. 4. 24. 해석)



- 주: 1. 별표는 규모 3.1 지진 발생 위치
 2. 연결통로가 생성된다면 양 시추공 끝단 사이에 미소진동이 위치해야 하나 실제 발생하는 미소진동의 위치는 PX-1의 아래 좌측 하단부에 발생하였으므로 연결통로 생성의 근거로 보기는 곤란
 자료: 지자연 제출자료 재구성

다. 지진 위험도 분석없이 4, 5차 수리자극 실시

“Basel EGS Project의 미소진동관리 사례연구”(2013년 12월)에 따르면 바젤 지열발전 프로젝트에서는 첫 번째 시추공(Basel 1) 수리자극 중 규모 2.6 지진이 관측되면서 미소진동 안전관리 시스템에 따라 즉시 주입률과 압력을 감소시켰으나 1시간 후에 규모 3.4의 지진이 추가로 발생함으로써 수리자극이 중지되고 예

정되었던 두 번째 시추공(Basel 2)의 시추도 중단된 것으로 서술되어 있다.

그리고 위 보고서에는 바젤시 주변 인근 국가들인 스위스, 독일, 프랑스 3국의 관련 전문가로 구성된 SERIANEX에서 3년여의 조사를 거쳐 바젤 지열발전 프로젝트의 지진 위험도(seismic risk)를 분석¹¹⁾한 결과 프로젝트를 계속 추진할 경우 바젤시 주변의 단층이 자극을 받음으로써 개발단계에서 30번(그 중 9번은 규모 3.4 수준 또는 그 이상), 30년간의 운영기간에서 최소 14번에서 최대 170번에 이르는 지진이 발생할 우려가 있으며 최대 규모는 4.5로 예상되어 바젤 지열발전 프로젝트는 완전히 중단하는 것으로 서술되어 있다.

따라서 ☆☆ 컨소시엄은 국내 최초로 진행 중인 “MW급 상용화 과제”로 인해 “미소진동 관리 신호등체계”의 최고 등급에 해당하는 규모 3.1 지진이 발생한 경우 추가 수리자극에 따른 지진 발생 규모 등을 분석하기 위하여 스위스 바젤 사례를 참고하여 사업을 일시 중지하고 지진 위험도 분석을 실시¹²⁾하여야 했다.

이와 관련하여 감사원 감사기간 중 3차 수리자극 이후 추가 수리자극 시 발생 가능한 지진 규모에 대해 점검한 결과 b-값¹³⁾ 하락, 주입량 대비 지진규모의 가파른 증가 등 아래 내용과 같이 지진의 규모가 커질 가능성이 있었던 것으로 확인되었다.

-
- 11) 스위스 바젤의 경우 SERISNEX에서는 해당 지역이 얼마나 지진에 위험한 가를 분석하는 지진 위험도 분석을 실시. 지진 위험도 분석은 지진재해의 확률을 분석한 지진재해도 분석[① 수리자극에 의해 발생한 지진자료를 정밀분석하여 3차원적으로 단층면의 형태와 크기를 파악 ② 수리자극에서 시행한 주입압, 주입률에 따라 단층에 가해지는 공극압 변화를 계산 ③ 실제 수리자극에 의한 결과와 시뮬레이션 결과가 일치할 수 있도록 매개변수 조정 ④ 수리자극의 경우와 지열발전(순환)의 경우를 가정하여 최대 발생 가능한 지진 규모 등을 예측]과 지진 발생에 따른 해당 지역의 건물 또는 구조물에 미치는 영향을 산정하는 취약도 분석을 하여 도출
- 12) 대한지질학회 연구용역보고서에는 스위스 바젤의 경우 주정부가 사업자로부터 지진자료를 제출받고 SERIANEX를 구성하여 지진 위험도 분석을 실시한 것으로 기재되어 있음. “MW급 상용화 과제”의 경우 지진 위험도 분석의 주체가 명확하지 않으므로 규모 3.1 지진 발생 이후 ☆☆ 컨소시엄이 직접 지진 위험도 분석을 실시하거나, 예기평 및 산업부와 협의 등을 통하여 지진 위험도 분석이 실시될 수 있도록 하였어야 한다고 판단됨
- 13) 지진 발생 횟수와 규모의 관계를 나타내는 값으로 낮은 b-값은 이전보다 더 큰 규모의 지진이 발생하거나 지진이 발생하여도 큰 규모의 지진 발생 빈도가 상대적으로 많아짐을 의미함

1) b-값 하락

미국 에너지부의 「유발지진 프로토콜」(Induced Seismicity Protocol, 2012년)에 따르면 지열발전 사업의 성공적 운영과 재해 저감을 위해서는 사업자가 확률론적 지진재해도 분석을 수행하기에 충분한 지진자료를 모으고 구텐베르크 리히터 법칙의 b-값을 추정하는 것이 필수적이라고 되어 있다.¹⁴⁾

한편 컨소시엄 참여기관인 서울대학교는 2차 수리자극 이후 2016. 12. 30. 지진 횟수와 지진 규모에 관한 b-값 분석 결과 2016. 12. 15.부터 2016. 12. 22.까지의 PX-1에서의 지진횟수와 지진규모에 관한 b-값은 0.836이었으나, 2016. 12. 15.부터 2016. 12. 30.까지의 b-값은 0.744로 낮아졌으므로¹⁵⁾ 같은 횟수의 미소진동이 발생하더라도 더 큰 규모의 지진이 발생할 확률이 높고, PX-2가 막혀 있어 PX-1에서 주입한 물이 PX-2 쪽으로 가지 못하고 지진이 발생하기 쉬운 임계 상태의 영역을 자극하여 그 이상의 지진이 발생할 수 있다는 분석결과¹⁶⁾를 컨소시엄에 이메일로 보냈고¹⁷⁾, 2017. 1. 30. 컨소시엄 실무회의¹⁸⁾에서 위 내용을 발표하였다.

14) 대한지질학회 연구용역보고서

15) 2016. 12. 23. 규모 2.2 지진이 발생하고, 2016. 12. 29. 규모 2.3의 지진이 발생하는 등 짧은 기간에 큰 지진이 잇달아 발생하자 b-값이 하락

16) 서울대학교 B 교수는 2016. 12. 23. 규모 2.2의 지진이 발생하기 전날인 12. 22.까지 이벤트 642개를 분석한 결과 규모 2.0의 지진이 발생할 확률이 0.16%이고 기대 개수는 1.05개, 12. 30.까지 발생한 이벤트 815개를 분석한 결과 규모 2.0의 지진이 발생할 확률이 0.26%, 기대 개수가 2.09개로 나와 규모 2.2의 지진이 발생한 이후 조심해야 한다는 것을 정량적으로 보여주는 의미 있는 분석 결과로 판단했다고 감사원 감사시 진술

17) 서울대학교 박사과정 중인 AE 연구원이 b-값 분석 결과를 컨소시엄 연구단에 송부. 서울대학교의 b-값 분석결과에 대해 당시 지자연 E 박사가 컨소시엄 연구책임자 등에게 보낸 이메일에서 “b-값 분석은 우리도 일찌감치 해봤고요...(중략) PX-2 쪽이 막혀 있어서 물이 다른 곳으로 흘러 계속 거기에서 큰 이벤트가 생긴다는 분석에는 동의하기 어렵고요”라고 되어 있으나 이번 감사 시 지자연 E 박사는 분석자료가 남아있지 않아 당시 지자연이 분석했다고 주장하는 b-값 자료를 제출하지 못하고 있고, 통상적인 지진 관측과는 달리 규모 1.0 이하의 지진 개수가 너무 많아 규모 산정값의 신뢰도가 완전하지 않아 분석 결과에 큰 의미를 두지 않았다고 진술함. 이에 대해 서울대학교 B 교수는 감사원 감사기간에 자연지진의 경우 관측이 어렵기 때문에 상대적으로 큰 지진규모 데이터를 사용하는 것이고, 수리자극의 경우 미소지진 관측망이 있기 때문에 규모 1.0 이하의 지진데이터도 자료의 신뢰성이 있다면 활용할 수 있다고 진술

18) ☆☆, 서울대학교, 지자연 연구책임자 참석

이후 ☆☆ 컨소시엄은 2017. 3. 16.부터 같은 해 4. 14.까지 PX-2에 3차 수리자극을 실시하였고, 같은 해 4. 15. 규모 3.1 지진이 발생하였다.

따라서 ☆☆ 컨소시엄은 규모 3.1 지진 발생 이후 b-값을 분석하여 향후 발생할 지진 규모에 대해 검토하여야 했다.

그런데 ☆☆ 컨소시엄¹⁹⁾은 3차 수리자극 과정 중 2차 수리자극에서 발생한 규모 2.2의 지진보다 더 큰 규모인 규모 3.1의 지진이 발생하였는데도 3차 수리자극 이후 b-값을 분석하지 아니하였다.

이에 대해 감사원 감사기간 중 ☆☆ 컨소시엄 참여기관인 서울대학교를 통하여 수리자극 차수별 b-값을 분석한 결과, [표 20]과 같이 PX-2에 대한 3차 수리자극 결과 규모 3.1 지진 발생 등으로 인해 b-값이 0.686에서 0.624로 낮아지고 있어 PX-2에서 수리자극으로 인해 향후 발생할 지진의 규모가 커질 가능성이 있었던 것으로 확인되었다.

[표 20] 수리자극에 따른 b-값 내역^{주1)}

구분		1차 수리자극	2차 수리자극	3차 수리자극	4차 수리자극	5차 수리자극
서울대학교가 수리자극 기간 중 분석한 결과		미분석	0.836→0.744	미분석	미분석	미분석
감사기간 중 서울대학교가 추가 분석한 결과	PX-2	0.686	-	0.624	-	0.628 ^{주2)}
	PX-1	-	0.938→0.815 ^{주3)} 0.782 ^{주4)}	-	0.788	

- 주: 1. 2차 수리자극 시 b-값을 분석한 서울대학교에 요청하여 분석한 자료로 계산방식의 차이 등으로 다른 자료에서 제시된 b-값과 다소 상이할 수 있음. 서울대학교에서 2차 수리자극 중 b-값을 분석하면서 2차 수리자극(PX-1)으로 발생한 유발지진만 고려하였고, PX-1과 PX-2가 수리적으로 연결되지 않았다는 점을 고려하여 각 시추공별로 b-값을 따로 산출
2. 5차 수리자극에 따른 b-값은 규모 5.4 지진을 포함하지 않고 산출한 값임
3. 2차 수리자극 시 분석한 b-값(0.836→0.744)은 지자연에서 제공한 진폭값(당시 지진 규모가 아닌 진폭값을

19) 2차 수리자극 기간 중 서울대학교에서 b-값을 분석하였지만 컨소시엄 내에서 b-값 분석 등 지진위험성 분석에 대한 업무분장이 명확하지 않음

제공받음)을 기상청 지진기록을 이용하여 지진 규모를 환산하는 등의 방식으로 산출한 값이고, 감사기간 중 분석한 b-값(0.938→0.815)은 지자연에서 제공받은 지진 규모를 이용하여 산출한 값임

4. b-값을 산출할 때에는 수리자극 이후 발생하는 유발지진을 모두 고려하여야 하나 서울대학교에서 수리자극 기간 중 분석한 b-값(0.744)과 감사기간 중 추가 분석한 b-값(0.815)은 2차 수리자극 종료일(2016. 12. 30.)까지 발생한 유발지진만을 대상으로 산출하여 감사원 감사기간 중 산출한 b-값(0.782)과 상이

자료: 서울대학교 제출자료 재구성

2) 주입량 대비 지진 규모의 가파른 증가

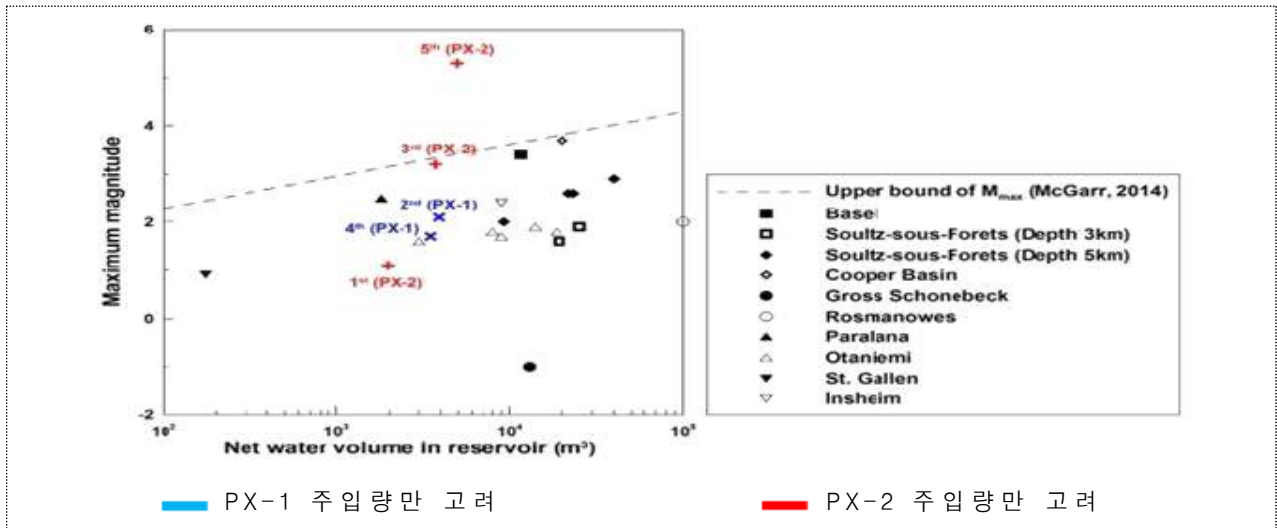
☆☆ 권소시엄이 포항지열발전 가이드라인으로 사용하기 위해 2015년 12월에 작성한 “포항 EGS 프로젝트 미소진동 관리방안”에 따르면, 2013년부터 맥가(McGarr) 등²⁰⁾의 연구로부터 [그림 17]과 같이 주입된 유체의 부피(injected volume)가 커질수록 미소진동의 최대 규모(Maximum Observed Magnitude)가 커지는 것을 알 수 있다고 하였다.

이와 관련하여 포항 지열발전의 물 주입량 대비 지진 발생 규모의 추이를 기존 이론들과 비교해 본 결과, 포항의 경우 [그림 14]와 같이 물 주입량 대비 지진 발생 규모가 가파르게 변화하는 등 기존에 알려진 유발지진 추이를 벗어나고 있어 적은 양의 물 주입에도 더 민감하게 반응하고 있는 상황²¹⁾이었다.

[그림 17] 물 주입량 대비 지진발생 규모 추이

20) Zang A. et al., Analysis of induced seismicity in geothermal reservoirs - An overview, Geothermics, 52, (2015), pp. 6-21. McGarr A. Maximum magnitude earthquakes induced by fluid injection[J]. Journal of Geophysical Research: solid earth, 119(2), 2014, pp. 1008-1019. Jung R. EGS-Goodbye or Back to the Future[C]//ISRM International Conference for Effective and Sustainable Hydraulic Fracturing. International Society for Rock Mechanics, 2013

21) ☆☆ K 대표이사는 규모 3.1의 지진이 맥가(McGarr)가 제안한 지진 발생 규모를 초과한 상황은 아니었다고 주장. 이에 대해 대한지질학회 연구용역보고서에 따르면 포항 EGS 사업 부지에서 수행한 수리자극 시험의 경우 지열 저류층 내에 주입된 유체의 부피와 최대 유발지진 규모의 관계가 McGarr(2014)가 제안한 추세를 벗어나 주입된 유체의 부피가 조금만 증가해도 최대 유발지진 규모가 급격히 증가하는 것을 볼 수 있고, 신호등 체계의 적색 경보를 넘어서는 규모 3.1 지진이 발생했을 때에는 유체 주입 부피와 최대 유발지진 규모의 관계를 파악하는 등 지진 위험도에 대한 상세 분석이 필요하였던 것으로 기술



주: 1. 점선은 맥가이론에 따른 순 주입량(net injection volume)과 유발지진 규모(Seismic Moment)와의 상관관계와 그 추세선이며, 포함의 PX-1, PX-2는 특히 PX-2의 경우 위 맥가이론의 추세선과 다르게 조금만 물주입을 증가시켜도 유발지진 규모가 급격하게 증가함

2. 핀란드 오타니에미, 프랑스 솔츠 등 외국 사례의 그림에서 보듯이 지진 최대규모와 추세 모두 맥가이론의 범주 내에 있음

자료: 대한지질학회 연구용역 보고

그런데 ☆☆ 컨소시엄은 규모 3.1 지진이 발생하였을 뿐 아니라 “1)항”, “2)항”과 같이 b-값 하락, 주입량 대비 지진 규모의 가파른 증가 등 규모 3.1 지진 발생 이후 더 큰 규모의 지진이 발생할 가능성이 높아지고 있었는데도 지진 위험도 분석을 하지 않은 채 4차²²⁾와 5차 수리자극을 진행하였다.

라. 주입한계량을 고려하지 않은 5차 수리자극 실시

♡♡팀은 ☆☆의 3차 수리자극 시 PX-2 물 주입 중에도 PX-1에서의 배수량이 증가하지 않고 일정하였다는 점 등을 근거로 4차 수리자극 전인 2017년 6월부터 7월까지 ☆☆ 컨소시엄과의 회의에서 두 지열정 사이에 수리적 연결이 없다는 의견을 지속적으로 제기하였다.

22) 서울대학교 B 교수는 PX-2에서 4차 수리자극을 실시하지 않은 이유에 대하여 PX-2에서 규모 3.1 지진이 발생하고, 물주입이 잘 안되었던 점을 감안하여 PX-1에서 수리자극을 실시하였던 것이고, 4차 수리자극 시 신호등 체계 변경 등 안전조치를 취했다고 하나 유발지진의 위험성을 100% 배제하지 못하고, 포항지역 주민들이 이를 충분히 인지하지 못한 상태에서 수리자극을 실시한 것은 잘못되었던 점이라고 진술

< ♡♡ 팀에서 PX-1과 PX-2의 수리적 미연결을 언급한 내용 >

■ 2017. 6. 15. 독일 포츠담 회의록

(“15. 6. 2017. WP5 meeting in Potsdam”)

- AR: 두 지열정 사이에 수리적 연결? 직접적인 수리적 연결은 없다.(Hydraulic connection between wells? No direct connection)
- AO: 지열정 사이에 순환이 있을 것이라고 예상하지 않는다.(AO does not foresee circulation between the wells)
- CZ: 두 지열정 사이에 암석단열(단층의 균열)이 연결되었다는 명백한 증거를 제시하는 도해가 없다.(No diagram has been presented that shows clear indication of fracture connection between the two wells)

■ 2017년 6월 Recommendation

(“Recommendation by the ♡♡ group regarding the current situation and the next action at EGS site in Pohang”)

- 두 지열정 사이에 수리적 연결이 없음(No hydraulic connection between the two wells)

■ 2017. 7. 3. ♡♡ 팀의 4차 수리자극 스케줄

(“3. 7. 2017. Proposed schedule for the ♡♡-led soft stimulation treatment in Pohang PX-1A²³⁾”)

- PX-1A와 PX-2 사이에 수리적 연결이 달성되지 않았다.(No hydraulic connection was achieved between PX-1A and PX-2.)

주: ♡♡팀은 사이드트래킹 한 PX-1을 PX-1A로 일컬음

자료: ☆☆ 제출자료 재구성

이후, ♡♡팀은 2017. 8. 7.~8. 14. 진행된 4차 수리자극 시 2016년 12월에 실시한 2차 물 주입 당시 PX-1에 3,675m³의 물을 순주입하였을 때 2016. 12. 29. 규모 2.3의 지진이 발생한 점과 당시 PX-1에 1,500m³의 물이 남아 있는 것을 고려하여 2,000m³²³⁾를 주입한계량(limited maximum volume)으로 산정한 후 실제 1,756m³의 물을 주입하던 중 2017. 8. 14. 규모 1.8의 지진이 발생하자 수리자극을 중단하였다.

그리고 ♡♡팀은 2017. 8. 22. ☆☆에 4차 수리자극 결과 수리적 연결이 개선폰되지 않았으므로 활성화된 지역으로 사이드트래킹²⁴⁾을 실시할 것을 권고하였

23) 3,675m³(2차 물 주입 시 순주입량)-1,500m³[PX-1에서 잔존하고 있다고 추정되는 물의 양(배수량 제외)]-175m³(안전여유량)=2,000m³[자료: Soft stimulation schedule for PX-1(2017. 8. 3.), Cyclic soft stimulation (CSS): a new fluid injection protocol and traffic light system to mitigate seismic risks of hydraulic stimulation treatments(2018, Hannes Hofmann et al. Geothermal Energy)]

24) 사이드트래킹(Sidettracking)은 기존에 계획했던 방향이 아닌 수리적 연결 가능성이 높은 방향으로 시추방향을 변경하는 우회 시추를 일컬음

다.²⁵⁾

또한, 서울대학교 B 교수는 5차 수리자극 직전 PX-1과 PX-2가 수리적으로 연결되지 않았다는 전제 하에 2017. 8. 27. 규모 3.1 지진 발생 이후 PX-2의 배수량이 181m³이므로 그 이상을 주입할 경우 유사 규모의 지진이 발생할 가능성이 매우 크다는 의견을 ☆☆ V 이사 등 ☆☆ 컨소시엄 담당자들에게 전달하였다.

이와 관련하여 ☆☆ V 이사²⁶⁾는 규모 3.1의 지진이 발생하였던 당시 PX-2에 누적된 순주입량을 고려하여 2017. 8. 30. 8:55 공별 주입가능 총량(주입한계량)을 3,500m³로 정하고, 그 당시 PX-2에 3,100m³²⁷⁾가 잔류하고 있으므로 5차 수리자극 시에는 320m³²⁸⁾ 정도의 물만을 더 주입하겠다는 내용의 주입계획을 ☆☆ 컨소시엄 담당자들에게 이메일로 통보한 바 있다.

따라서 ☆☆는 규모 3.1 지진 발생 이후 지진 위험도 분석없이 5차 수리자극을 실시하지 않아야 했으며 지진 발생 내역을 고려하여 주입한계량을 제대로 정하고²⁹⁾ 이를 초과하지 않도록 하여야 했다³⁰⁾.

25) ♡♡팀은 2017. 6. 15. 포츠담에서 규모 3.1 지진 발생에 대한 회의결과 PX-2에 대한 추가적인 수리자극은 시추공 막힘을 더 악화시키므로 수리자극을 하지 말고, 화약을 사용하거나, 사이드트래킹을 실시할 것을 권고하였음 [Recommendations by the ♡♡ group regarding the current situation and the next action at EGS site(2017. 6. 22.)]

26) 포항지열발전 현장소장

27) 실제 잔류량은 3,168m³

28) $(3,500\text{m}^3 - 3,100\text{m}^3) \times 0.8(\text{안전율}) = 320\text{m}^3$

29) 주입한계량은 산정할 때는 “미소진동 관리 신호등체계”의 최고등급이 규모 2.5인 점을 고려하여 규모 2.5 이하를 기준으로 주입한계량을 산정하는 것이 바람직할 것으로 보이며, ♡♡팀의 경우 4차 수리자극 시 규모 2.5보다 낮은 규모 2.0을 기준으로 주입한계량을 산정함. 이번 감사원 감사 시 서울대학교 B 교수에게 신호등 체계에 따른 최대 발생 예상 지진 규모를 2.5로 가정했을 때 PX-2 5차 수리자극 시 최대 가능 누적 순주입량이 얼마나 되는지 질문하였으나, 물이 주입되었을 때 땅속 수km 지하에 있는 암반과 균열 등이 어떻게 반응하는지를 높은 정밀도로 예측하는 것은 어려운 작업이기 때문에 산정이 쉽지 않다고 하면서, 다만 3차 수리자극 후 배출된 물 양이 557m³로 매우 적은 양이므로 그 이상 물을 주입하는 것은 지진 위험이 크다고 답변

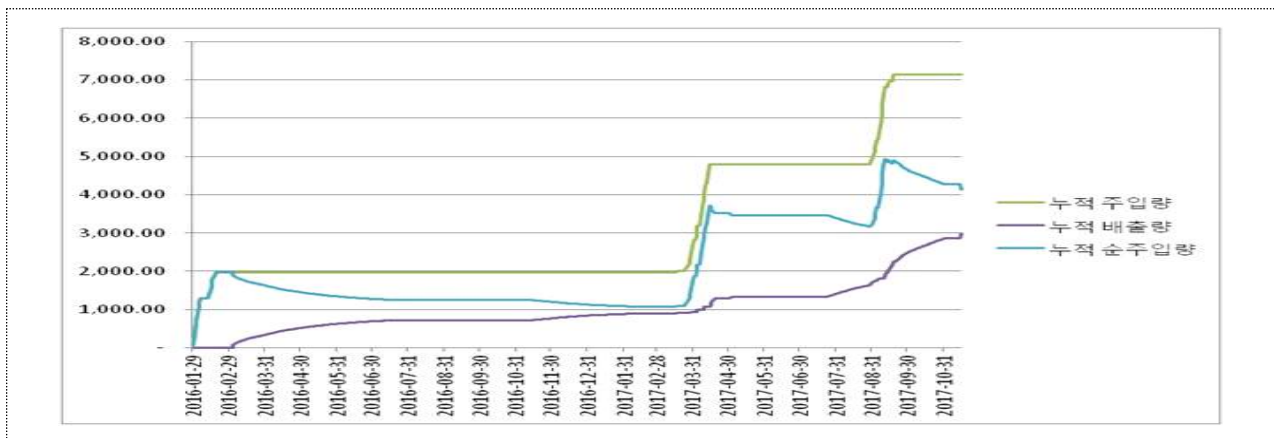
30) 대한지질학회 연구용역보고서에 따르면 규모 3.1 지진 발생 이후 사업을 중지하고, 지진 위험도 분석 등 과학적 조사를 해야 한다는 의견을 제시. 그런데도 규모 3.1 지진 발생 이후 주입량에 대한 의견을 제시하여야 한다면 5차 수리자극 시 규모 3.1 지진 발생 당시 최대 누적 순주입량 3,724m³을 초과하지 않도록 관리했어야 한다는 의견을 제시

그런데도 ☆☆는 2017. 8. 30. 13:00부터 같은 해 9. 18.까지 지속된 5차 수리 자극 기간 중 V 이사가 당초 계획한 320m³보다 1,400여m³나 많은 1,722m³³¹⁾의 물을 PX-2에 순주입하였다.³²⁾

이에 따라, [그림 18]과 같이 5차 수리 자극 기간 중 최대 누적 순주입량이 규모 3.1 지진 발생 전날인 2017. 4. 14. PX-2의 최대 누적 순주입량 3,724m³보다도 1,208m³³³⁾ 더 많은 4,932m³³⁴⁾에 이르게 되었다.

[그림 18] PX-2의 5차 수리 자극까지의 주입량 변화

(단위: m³)



주: 누적 주입량에서 누적 배출량을 빼면 누적 순주입량이 산출되며, 누적 주입량에 비해 누적 배출량이 감소하여 누적 순주입량은 규모 3.1 지진이 발생한 2017년 4월 이후에도 지속적으로 증가하고 있음

자료: ☆☆ 컨소시엄 제출자료 재구성

31) 순주입량 1,722m³=총주입량 2,334m³-배수량 612m³(기간: 2017. 8. 30.~9. 18.)

☆☆ V 이사는 주입계획과 달리 1,722m³의 물을 주입하게 된 사유에 대해 2017. 8. 30. 송부한 주입계획에 대해 지자연 E 박사가 “V 이사님의 추정은 각 시추공에 연결된 저류층이 서로 독립되어 있다는 가정하에서만 이루어질 수 있는데, 저는 좀 걱정스럽네요. 현재 PX-1에 설치된 펌프를 가지고 좀 더 양수를 해보심이 어떨지요?”라는 답장을 보내 PX-1과 PX-2가 연결되었다고 판단하여 1,722m³의 물을 주입한 것이라고 답변. 다만, V 이사는 의사 결정 과정은 잘 기억이 나지 않으나 본인이 결정할 만한 사항은 아니라고 진술. 지자연 E 박사는 위와 같은 메일을 보낸 이유에 대해 두 시추공이 압력 등의 영향을 받을 것 같은데 주입량을 단순히 나누어 산정하는 것에 대해 걱정스럽다고 표현한 것이고 얼마나 주입하여야 되는지에 대한 의견을 제시한 것은 아니라고 진술. ☆☆ K 대표이사는 B 교수가 PX-2의 배수량이 적음에 대해 문제제기를 하여 공별 주입량과 배수량을 검토하였지만 포항지열발전소라는 같은 사이트 내의 단일 저류층에 물이 들어가는 것이므로 두 개공을 각각 구별하지 않고 PX-1과 PX-2에 주입하는 주입량과 배수량을 합산하여 계산하였다고 답변

32) 서울대학교 B 교수는 3차 수리 자극과는 달리 5차 수리 자극 중에는 ☆☆에서 결과자료를 보내주지 않아서 주입 현황을 파악할 수 없었다고 진술

33) 규모 3.1 지진이 발생한 2017. 4. 15.부터 5차 수리 자극 기간 중 최대 누적 순주입량을 기록한 2017. 9. 11.까지 PX-2의 순주입량은 1,208m³(총주입량 2,018m³-배수량 810m³)

34) 5차 수리 자극 기간(2017. 8. 30.~9. 18.) 중 2017. 9. 11.에 최대 누적 순주입량 4,932m³에 이르렀다가 배수량 증가로 최대 누적 순주입량이 감소하여 2017. 9. 18. 4,890m³에 달함(3,168m³+1,722m³)

2. 산업부의 규모 3.1 지진 발생 이후 대응조치 부적정

「재난 및 안전관리 기본법」(이하 “재난안전법”이라 한다) 제3조 제5호 가목에 따르면 중앙행정기관 및 지방자치단체는 재난관리업무를 하는 재난관리책임기관이며, 같은 법 제25조의2에 따르면 재난관리책임기관의 장은 소관 관리 대상 업무의 분야에서 재난 발생을 사전에 방지하기 위하여 재난의 예측 및 예측정보 등의 제공·이용에 관한 체계 구축, 재난이 발생할 위험이 높은 분야에 대한 안전관리체계 구축 및 안전관리규정 제정 등 재난을 예방하기 위하여 필요하다고 인정되는 조치를 하여야 한다.

그리고 재난안전법 제4조 제1항에 따르면 국가와 지방자치단체는 재난이나 그 밖의 각종 사고로부터 국민의 생명·신체 및 재산을 보호할 책무를 지고, 재난이나 그 밖의 각종 사고를 예방하고 피해를 줄이기 위하여 노력하고, 발생한 피해를 신속히 대응·복구하기 위한 계획을 수립·시행하도록 되어 있다.

또한 「지진·화산재해대책법」 제3조 제3항에 따르면 재난관리책임기관의 장은 지진·화산재해를 줄이기 위하여 지진·화산재해 경감대책 강구 등 소관 사항에 대하여 필요한 조치를 하도록 되어 있다.

한편, 산업부(☼과 신재생에너지 R&D 담당자³⁵⁾ T)는 2014년 3월경에 예기평(X 팀 지열과제 담당자 AJ)에 지열발전에 따른 미소진동 관리방안을 설명해달라고 유선상으로 요청하여 2014. 3. 28. 산업부 지열에너지원 담당 Q³⁶⁾, T, 예기평 U 연구원, 서울대학교 B 교수, ☆☆ K 대표이사 등이 참석한 회의가 산업부에서 개최되

35) ☼과에는 지열, 태양광 등 신재생에너지 R&D를 총괄하는 담당자와 지열에너지원 등 각 에너지원 담당자가 분리되어 있음

36) Q는 지열에너지원을 담당하면서 미국 에너지부 홈페이지에 자주 접속하던 중 우연히 프로토콜 자료를 발견한 후 유용한 자료라고 생각하여 2014년 초에 신재생에너지 R&D 담당인 T에게 위 자료를 메신저로 전달하였다고 진술

었으며, 위 회의에서 서울대학교 B 교수는 2006년에 EGS로 인해 규모 3.4의 지진이 일어난 스위스 바젤 사례와 미국 에너지부의 “EGS 유발지진 프로토콜”³⁷⁾ 사례 등을 보고하였고, ☆☆ K 대표도 포항 EGS 지열발전 사업의 수리자극으로 인한 주변 환경 피해를 최소화하기 위해 미소진동 관리방안을 수립할 것이라고 보고하였으며, 산업부 사무관들은 ‘미소진동 관리방안 수립에 만전을 기하라’고 당부³⁸⁾하였다.

또한 산업부가 심부지열발전의 상용화 이전에 법체계 및 지원방안 수립에 참고하기 위해 2013년부터 ☆☆ 컨소시엄 참여기관인 ♡♡에 연구 용역을 수행하게 한 “심부지열 개발·이용·보급을 위한 법제화 방안 연구”³⁹⁾보고서(2014. 6. 30.)에도 [표 22]와 같이 ‘심부지열 개발에 필수적으로 동반되는 수리자극 기술은 미소지진을 유도하고 스위스 바젤 프로젝트를 비롯한 일부 EGS 프로젝트에서 미소지진 관리에 실패하였으며, 특히 스위스 바젤에서는 규모 3.4의 지진이 일어나서, 프로젝트가 중단되었다’는 내용이 포함되어 있다.

더욱이 2014. 4. 1. 산업부에서 산업부 지열에너지원 담당 Q, ☆☆ K 대표이사와 ♡♡ R 대표이사가 참석한 심부지열 법제화 방안 회의에서 Q는 지열발전이 환경에 영향을 미치는 상황(미세진동 발생)이 발생하면 끝장이라는 표현을 반복하여 사용하면서 심부지열 법제화 방안 결과 보고서에 법령 개정방안을 검토하여 줄 것을 요청하였다.⁴⁰⁾

37) Protocol for Addressing Induced Seismicity Associated with Enhanced Geothermal Systems(2012)

38) B 교수가 작성한 서울대학교 출장보고서에는 B 교수가 미소진동과 관련한 정의, 해외 사례, 해외의 미소진동 관리 방안, 포항 EGS 현장에서의 미소진동 관리방안 추진경과를 보고하고, ☆☆ K 대표이사가 2013년 1월부터 미소진동 관리방안을 수립 중에 있으며 수리자극으로 인한 주변 환경 피해를 최소화하기 위해 추후 진행될 수리자극 이전에 관리방안을 확정할 계획임을 보고하였다고 기재되어 있음. 또한, “Q 및 T가 미소진동 관리방안 수립에 만전을 기하도록 당부했다”라고 기재

39) 연구용역기간: 2013년 11월~2014년 5월, 예산: 56백만 원(발주 시 담당자: Q, 완료 시 담당자: AA), 연구 목적: 심부지열에너지 산업을 육성하고자 해외 심부지열 개발·이용·보급의 성공적 사례를 분석하여 국내 심부지열 법제화 및 정책방안 수립에 기여

40) ♡♡ R 대표이사가 산업부 회의 다음 날인 2014. 4. 2. ☆☆ K 대표이사 등 컨소시엄 관련자에게 보낸 메일에

[표 22] “심부지열 개발·이용·보급을 위한 법제화방안 연구” 최종 보고서

목차	내용
1.1 지열에너지 이용의 환경영향 (p.328)	현재까지 알려진 지열에너지 개발의 가장 큰 단점은 인공 지열 저류층 형성 시 발생하는 미소지진과 생산공에서의 지하 유압 감소에 따른 지표 침하 등을 들 수 있다. 스위스 바젤 지역에서 진행된 EGS 프로젝트의 경우 2006년과 2007년에 리히터 규모 3.3의 미소지진이 유체주입에 의하여 유발되어 프로젝트가 중단된 사례도 있다(Telegraph, 2007). 이 지역의 경우 과거 지진에 의해 큰 피해를 입은 경험이 있는 지역이어서 지역주민들의 강한 거부감을 불러일으킨 것으로 알려지고 있다.

자료: 산업부 제출자료 재구성

한편, 산업부는 2017. 4. 17.(월) 에기평으로부터 이메일로 [별표 9] “규모 3.1 지진 발생 보고”와 같이 4. 15.(토) 포항 지역에 규모 3.1 지진과 규모 2.0 지진이 발생하여 지열발전과제 현장에서 수리자극을 중단하고, 배수를 시작했다는 내용과 함께 “미소진동 관리 신호등 체계”와 지진발생 이후 시간대별 현장조치 상황, 전달인 4. 16.(일) 컨소시엄 내 연구단 회의를 소집하여 상세 기술분석 및 대응방향을 검토 중이라는 내용의 ☆☆의 공문을 받았다.

더욱이 [표 23]과 같이 산업부는 2016년부터 2018년까지 에기평으로부터 R&D 과제 수행 과정에서 발생한 안전사고를 보고받은 경우가 2017년 총 2건밖에 없었다.

[표 23] 에기평에서 R&D 과제로 인한 안전사고를 산업부에 보고한 사례(2016~2018년)

과제명	보고 일자	내용
MW급 상용화 과제	2017. 4. 17.	포항 지열발전과제 현장 인근에서의 규모 3.1 지진 발생 사실 및 현장조치사항 보고
28MW급 배터리 에너지 저장 시스템 ^{주1)} (BESS) 시스템 실증적용 및 통합운용 제어기술 개발	2017. 8. 2.	한전 고창전력시험센터 내 에너지 저장 시스템 ^{주2)} (ESS) 실증 현장 화재 발생 사실 보고
	2017. 8. 25.	화재 피해 규모 및 원인 보고, 과제 수행 중단 여부 검토 보고

주: 1. BESS(Battery Energy Storage System): 배터리 에너지 저장 시스템

2. ESS(Energy Storage System): 에너지 저장 시스템

기재되어 있는 내용임. 이와 관련하여 산업부 Q는 위 발언에 대해서 명확히 기억나지 않지만 상황을 볼 때 그와 같은 발언을 했다면 그 이유는 지열발전 과정에서 미소지진은 필연적으로 발생하기 때문에 관리가 필요하고 그래서 미국 에너지부에서 발간한 프로토콜을 R&D 과제관리 담당자인 T에게 전달하였던 것이라고 진술함

자료: 에기평 제출자료

따라서 산업부는 에기평으로부터 포항지열발전 현장 인근에서 규모 3.1의 지진이 발생하였다는 보고를 받았을 때 2014. 3. 28. 산업부 회의에서 보고받았던 스위스 바젤사례에서와 같이 지진 위험성으로 사업이 중단될 가능성이 있으므로 전담기관인 에기평이나 주관기관인 ☆☆에 문의하여 규모 3.1의 지진이 지열발전으로 발생한 지진인지 여부를 확인하고, 과제 일시 중지 및 지진 위험도 분석을 하는 등 지진 발생으로부터 국민의 생명·신체 및 재산을 보호하기 위해 안전조치를 검토하여야 했다.

그런데 산업부는 2017. 4. 17. 에기평으로부터 공문으로 같은 해 4. 15. 포항 지열발전 현장 인근에서 규모 3.1 지진 및 규모 2.0 지진이 두 차례 발생하였다는 내용과 함께 “미소진동 관리 신호등 체계”와 지진 발생 및 현장조치 현황, 시간대별 경과조치 보고를 받고도 해당 지진과 지열발전 연구과제의 연관성 등에 대해 확인하지 않았고, 유선으로 신호등 체계에 따라 수리자극 중지 및 배수 등의 조치가 이뤄졌다⁴¹⁾는 보고를 받고서도 현장에 피해가 없다는 말만 듣고 안전조치를 하지 않았다.

더욱이 산업부는 2017. 5. 26. [표 24]와 같이 지자연으로부터 제출받은 “한국의 지열 부존 현황 및 지열자원 평가” 과제⁴²⁾ 연구용역 보고서에 바젤(Basel),

41) 감사원 감사 시 에기평 담당자 W은 2017. 4. 17. 산업부에 규모 3.1 지진 발생 공문을 송부하면서 X와 통화한 내용에 대해 정확히 기억나지는 않고 ☆☆로부터 지진 발생 공문을 받아 이를 전달하니 확인해달라고 한 정도만 기억한다고 진술

산업부 ○과 X는 에기평 ○실 W 연구원으로부터 “규모 3.1의 지진이 발생하여 ☆☆에서 신호등 체계에 따라 수리자극 중지 및 배수 등의 조치를 하였으며 산업부에 보고하는 이유는 매뉴얼에 따라 규모 2.5 이상의 지진이 발생하면 보고하도록 되어 있기 때문이다”라고 들었으며, W에게 “지열발전 현장에 피해가 없는지 물었고 현장에 문제가 없다고 하여 추가로 조치할 게 있으면 알려달라고 했으나 별도의 연락이 없어 추가 검토를 하지 않았다”라고 진술

42) 연구용역기간: 2016. 4. 1.~2017. 3. 31., 예산: 1억 원(발주 시 담당자: AA, 완료 시 담당자: X)

술츠(Soultz) 등 해외의 여러 지열발전 프로젝트에서 발생한 유발지진과 이로 인해 프로젝트가 중단된 사례와 함께 수리자극 시 발생하는 유발지진의 위험성에 관한 내용이 포함되어 있었는데도 한 달여 전인 같은 해 4. 17. 이례적으로 보고받은 규모 3.1 지진이 지열발전 과제로 인해 발생한 유발지진인지 여부를 확인하지 않았고, 지진 위험도 분석을 하지 않았다.

[표 24] “한국의 지열 부존 현황 및 지열자원 평가” 최종 보고서

목차	내 용
EGS 개요 (p.118)	- 수리자극 중에는 유발지진을 모니터링하여 생성된 균열을 파악하여야 한다.
해외 EGS 프로젝트 소개 (p.125~126)	- 프랑스 술츠 EGS 사이트에서 기록된 유발지진은 M=2~2.7이다. - 스위스 바젤 EGS 프로젝트에서는...유발지진(>M=2.6)에 의해 수압 파쇄가 중단되었으며, 이후에 M=3.4의 유발지진이 발생하였으며 2009년에 프로젝트가 영구적으로 중단되었다. - 독일 란다우 EGS 프로젝트는 2009년에 M=2.7의 유발지진을 발생시켰으며 이로 인해 프로젝트가 일시적으로 중단되었다.
EGS 개발에 고려하여야 할 사항 (p.127)	- EGS의 인공 저류층을 만들기 위해 수행하는 수압 파쇄로 발생하는 유발지진은 많은 EGS 사이트에서 발생하였다. 예를 들면, 바젤(Basel, 2006년)에서 M=3.4, 란다우(Landau, 2009년)에서 M=2.6, 술츠(Soultz)에서 M=2.7, 쿠퍼베이신(Cooper Basin)에서 M=3.7, 파랄라나(Paralana)에서 M=2.5, 로스마노웨스(Rosmanowes)에서 M=2.0, 코스코(Cosco)에서 M=2.8, 베를린(Berlin)에서 M=4.4, 장크트갈렌(St.Gallen)에서 M=3.6 등의 유발지진이 기록되었다. 따라서 EGS 개발 중에 발생하는 유발지진에 대한 연구 및 기술개발이 더욱 필요하다고 판단된다.

자료: 산업부 제출자료 재구성

이에 따라 2017. 4. 15. 규모 3.1의 지진이 발생한 이후에도 지진 위험도 분석 없이 수리자극이 계속 진행되었고, 5차 수리자극이 중단된 2017. 9. 18. 이후 약 두 달이 지난 2017. 11. 15. 규모 5.4의 지진이 발생하였다.

관계기관 의견 및 검토결과

1) ☆☆의 경우

① 규모 3.1의 지진 발생 이후 예기평, 산업부에 보고 부실

☆☆ V 이사는 2017. 4. 15.과 같은 해 4. 17. 규모 3.1 지진 발생 보고를 하면서 해당 지진이 유발지진이라는 것을 예기평 담당자에게 설명하였는지 기억나지 않지만 ☆☆는 지열발전에 따른 유발미소진동으로 간주하여 예기평에 보고하였고, 예기평도 유발미소진동으로 간주하였을 것으로 판단하였다고 주장하였다.

☆☆가 규모 3.1 지진발생 이후에 규모 3.1 지진발생 사실과 함께 신호등 체계와 함께 현장조치사항을 같이 첨부하여 보내는 등 해당 지진이 유발지진인 것을 알리려고 노력했다고 주장하나, 해당 지진이 지열발전 과제로 인한 유발지진일 가능성이 높다고 규모 3.1 지진 발생 보고 공문에 명확하게 언급하지 않아 예기평과 산업부가 유발지진임을 제대로 인식하지 못했다고 주장할 수 있게 된 점에 대해서는 일부 책임이 있다고 판단된다.

② 규모 3.1 지진 발생 이후 지진 위험도 분석 미실시

☆☆ 컨소시엄은 ㉠ 3차 수리자극 이후 관측된 미소지진의 개수가 적어 b-값 분석을 실시하지 않았고, ㉡ 3차 수리자극 이후 미소진동의 발생 패턴 및 분포가 기존과 달라 새로운 파쇄대 면이 있을 수 있다는 사실을 실무회의에서 논의하였으나 추가 미소진동이 발생하지 않아 다른 추가 분석이나 조치를 하지 않았으며, ㉢ 물 주입량 대비 지진 발생 규모는 3차 수리자극 때까지 맥가 이론의 범주 내에서 문제가 없었다고 답변하였다.

그러나 ㉠ 대한지질학회 연구용역보고서를 보면 b-값 측정을 위해 필요한 지진의 수는 일률적으로 특정할 수 있는 것이 아니라고 되어 있고, 실제로도 “MW급 상용화 과제”와 관련하여 정부조사단, 대한지질학회 연구용역보고서 등 국내외 학자⁴³⁾들이 “MW급 상용화 과제”가 끝난 이후 전체적인 b-값 분석을 통해

지진위험성 분석을 수행한 것으로 보아 3차 수리자극 이후에도 b-값 분석이 불가능하거나 의미 없는 것은 아니며, 대한지질학회 연구용역보고서에서도 b-값 분석 등을 신호등 체계 수립이나 기타 지진 위험도 산출과정에 사용하지 않은 사실을 지적하고 있으며 ㉞ 지진은 대부분 기존 단층이 재활동에 의해 발생하므로 지진 발생 가능성을 평가하기 위해서는 지진발생 위치를 정확히 파악하고 주입 시 추공과의 근접성을 분석하는 것이 필요한데도 새롭게 확인된 지진의 발생 위치, 방향에 대한 조사를 실시하지 않았고, 3차 수리자극 때부터 심부시추공 지진계가 설치되어 있지 않는 등 지진 관측이 부실하게 수행되어 추가 지진이 발생했는지 여부를 알 수 없는 상황⁴⁴⁾이며 ㉟ 3차 수리자극 때까지의 지진 발생 규모는 맥가 이론의 추세선의 상한선을 초과하고 있지는 않으나 발생 추이는 맥가이론의 추세선의 기울기와는 현저하게 다르고, 대한지질학회 연구용역보고서에서도 물 주입량 대비 지진 발생 추이가 가파르게 증가하여 이에 대한 분석이 필요하였다고 밝히고 있어 ☆☆의 주장이 합리적이라고 판단하기 어렵다.

③ 5차 수리자극 시 주입량 과다 산정

☆☆는 PX-2에 5차 수리자극 시 3차 수리자극까지 최대 누적 순주입량인 3,724m³보다 1,208m³ 더 많은 4,932m³의 물을 주입한 사유에 대하여 ㉠ PX-1과 PX-2가 연결되었다고 판단⁴⁵⁾했고 ㉡ ♡♡팀에서 4차 수리자극 시 순주입했을

43) 2019. 11. 15. 포항지진 2주년 국제심포지엄에서 ◆◆대학교 교수는 “MW급 상용화 과제”의 5차 수리자극에 따른 지진발생 내역을 분석한 결과 b-값이 0.73이었다고 발표

44) 자세한 내용은 “가-7) 유발지진 관측 및 분석 부실”에 기재

45) ☆☆ K 대표는 PX-1과 PX-2 수리자극 이후 유발지진 분포도가 겹쳐 저류층이 형성되었다고 판단하였다고 진술. 대한지질학회 연구용역보고서에 따르면 지진 분포도는 PX-1과 PX-2의 연결 여부를 간접적으로 판단하는 방법으로 그 불확실성이 높기 때문에 두 시추공이 수리적으로 연결되어 있는지 확인하기 위해서는 수리간섭시험(하나의 관정에서 양수를 하고 다른 관정에서 수위변화를 관찰)이나 추적자 시험(하나의 관정에 화학종을 주입하고 다른 관정에서 화학종의 농도를 관찰) 등 수리지질학적인 방법을 확인하여야 한다고 하면서 포항 지열발전의 경우 각 시추공의 주입압력과 주입량을 고려했을 때 저류층이 연결되었다고 보기 어렵기 때문에 두 시추공의 순주입량을 따로 관리하는 것이 더 합리적이라고 기재

때의 PX-1과 PX-2를 합산한 최대 누적 순주입량인 6,720m³를 넘지 않으려고 노력했으며 ㉔ 실제로 5차 수리자극 때 두 시추공을 합산한 최대 누적 순물주입량은 2017년 9월 11일 6,660m³라고 주장한다.

그러나 ㉕ 컨소시엄 내 서울대학교 B 교수와 4차 수리자극을 실시한 ♡♡팀도 두 시추공이 수리적으로 연결되지 않은 것으로 판단하였고, ㉖ ♡♡팀의 경우 4차 수리자극 시 두 시추공 간의 수리적 연결이 안 됐음을 전제로 PX-1만 고려하여 현재 PX-1에 1,500m³의 물이 잔존하고 있는 것을 감안하여 2,000m³를 주입한계량(limited maximum volume)으로 산정하여 수리자극을 진행하였다.⁴⁶⁾

또한 대한지질학회 연구용역 보고서에서도 포항 지열발전 현장의 두 시추공 사이에 연결된 저류층(reservoir)이 있다고 보기 어렵기 때문에 두 시추공의 주입량을 따로 관리하는 것이 더 합리적이고, 두 공의 수리적 연결성이 확인되지 않은 상황에서 두 공의 연결성을 고려한 6,720m³ 주입 결정은 적절하지 않다고 밝히고 있다.

㉗ 그리고 2017. 9. 11.까지 최대 누적 순주입량이 6,660m³가 된 것은 의도적으로 4차 수리자극시 순주입량 수준으로 조절한 것이 아니라 케이싱 파손으로 인해 물주입을 중단한 결과로 판단되므로 ☆☆의 주장이 합리적이라고 보기 어렵다.

2) 산업부의 경우

① 2014. 3. 28. 산업부 회의 후속조치 부적정

46) ♡♡팀은 4차 수리자극 전인 2017. 8. 3. 포항현장에서 4차 수리자극 설계에 대한 회의를 개최하였고, ☆☆, 지자연, 서울대학교, 한국건설기술연구원 등이 참석하였다. 이날 회의에서 □□의 L 박사와 M 박사는 파워포인트(Soft stimulation schedule for PX-1) 설명자료를 발표하면서 cyclic soft stimulation의 주입 패턴 설명과 함께 신호등 체계에서 정한 최대 지진 규모를 2.5에서 2.0으로 낮추며 이와 연계하여 주입률과 주입압력을 낮추고, 물주입량을 따로 PX-1만 계산하여 2,000m³ 이하로 주입하는 것 등을 설명함

산업부는 ㉠ 2014. 3. 28. 산업부 회의에서 수리자극 시 발생하는 미소진동에 대한 언급은 있었으나 지진재해의 위험성 및 대책 마련의 필요성에 대한 언급이 없었고, ㉡ 기획·관리·평가 등의 과정에서 미소진동 관리의 필요성 및 규모 5.4의 지진이 촉발될 수 있다는 것을 모르는 상황에서 미국 에너지부 프로토콜에 대해 대략적인 내용만 알았다는 점, ㉢ 미국 에너지부 프로토콜은 미소진동에 따른 주민 불만 등의 이슈 관리에 유용한 절차를 제안하는 것이라는 점, ㉣ EGS 개발 시 발생하는 미소진동은 작은 규모라 위험성을 짐작하기 어려웠다는 점을 제시하며 산업부 회의 시 유발지진 대응방안을 마련할 필요성을 인지하지 못하였다고 답변하였다.

그러나 ㉠ 산업부 회의가 개최된 경위를 보면 산업부 지열에너지원 담당자인 Q는 지열발전 과정에서 미소지진이 필연적으로 발생하기 때문에 관리가 필요하다고 생각하여 신재생에너지 R&D 담당자 T에게 프로토콜 자료를 전달하였을 것이라고 답변하는 등 유발지진 관리의 필요성을 인지한 것으로 추정되며, 회의에서도 서울대학교 B 교수 등이 스위스 바젤 EGS 사업 추진시 규모 3.4의 지진으로 인해 사업이 중단된 사례 및 미국의 유발지진 프로토콜을 설명하였으므로 지진재해 위험성, 대책 마련 필요성은 충분히 설명되었던 것으로 판단되고 ㉡ 해당 회의에 참석하였던 B 교수의 내부 이메일에 Q가 해외 사례 등에 대해 공부를 많이 하여 관련 내용에 대해서 비교적 잘 파악하고 있으며 미국 에너지부 프로토콜도 밑줄을 쳐가며 공부한 것으로 보인다고 기재되어 있는 등 산업부가 미국 에너지부 프로토콜에 대해 대략적으로만 알고 있었다고 보기 어려우며 ㉢ 미국 에너지부 프로토콜은 단순히 주민 불만 등의 이슈 관리에 유용한 절차

가 아니라 유발지진에 따른 피해 확률 산정, 유발지진에 따른 피해 위험도 정량화 등 총 7단계로 구성된 미소진동에 대한 종합적인 관리방안이고, ④ 서울대학교 B 교수가 보고한 자료에는 바젤 사례 등 규모 3.4의 지진으로 인한 피해 발생 사례가 기재되어 있는 등 유발지진 대응방안을 마련할 필요성을 인지하지 못했다는 산업부의 주장을 정당한 사유로 인정하기 어렵다.

② “심부지열 개발·이용·보급을 위한 법제화 방안 연구” 용역결과보고 검토 부적정

산업부는 ① “심부지열 개발·이용·보급을 위한 법제화 방안 연구” 용역의 발주 목적은 심부지열 산업의 활성화를 위한 관계 법령 개정 및 지원정책 도입 방안에 대한 검토로서, 해당 연구 용역에 미소진동 관리시스템의 필요성이 언급되어 있으나 미소진동 관리를 지진재해 예방 대책 차원이 아니라 소음·진동관리 등의 차원으로 기술되어 있어 미소진동의 위험성을 파악하기 어려웠다고 답변하였고, ② 해당 연구 용역과 관련한 정책토론회에서 그 연구용역의 연구책임자이며 2014년 3월 산업부 회의 참여자인 서울대학교 B 교수가 미소진동은 사람이 거의 감지하지 못할 규모라고 설명한 점을 볼 때 서울대학교 B 교수도 미소진동 관리방안의 중요성을 인지하지 못했을 가능성이 높다고 답변하였다.

그러나 ① 해당 연구용역에서는 스위스 바젤지역에서 EGS 프로젝트가 규모 3.3의 지진이 유발되어 프로젝트가 중단되었다고 서술하고 있어, 해당 연구용역에서 EGS 프로젝트 미소진동 관리를 소음·진동관리 차원으로 기술하고 있어서 미소진동의 위험성을 파악하기 어려웠다는 산업부의 주장은 정당한 사유로 인정하기 어려우며, ② 최종 결과물인 해당 연구 용역보고서 유발지진 관리의 필요

성이 기재되어 있는데도 정책토론회에서 언급된 내용만을 가지고 서울대학교 B교수가 미소진동 관리방안의 중요성을 인지하지 못했을 가능성이 높다고 주장하는 것은 연구용역 검토에 대한 책임 회피에 불과하다.

③ 규모 3.1 지진 발생 보고 검토 부적정

산업부는 ㉠ 2017. 4. 17. ☆☆로부터 규모 3.1 지진 발생 보고를 받았지만 해당 보고 이전에 주관기관이나 전담기관으로부터 미소진동 발생 보고를 받은 바 없고, ㉡ 규모 3.1 지진 발생 당시 전문가들로부터 유발지진 가능성에 대한 의견 등이 없었으며, ㉢ ☆☆의 보고 내용도 지진과 수리자극의 연관성을 짐작할 수 있는 부분이 없었다고 답변하였다. 그리고 ㉣ 산업부 담당자가 규모 3.1 지진발생 보고를 받으면서 예기평으로부터 현장에 문제가 없으며 매뉴얼에 따라 수리자극이 중지되고 있음을 확인하였고, 예기평에 안전을 최우선으로 관리하고, 향후 추가 조치 필요성이 있으면 알려줄 것을 당부한 이후 별도의 보고나 지진 발생 보고가 없어 추가 지진 발생 가능성에 대한 대책의 필요성을 인지하기 어려웠다고 답변하였다.

그러나 ㉠ 연구 주관기관, 전담기관으로부터의 안전 관련 보고가 흔치 않은 상황에서 예기평을 통한 ☆☆의 지진 발생 보고에 대해 주의 깊게 검토할 필요가 있었고, ㉡ 산업부는 포항에서 지열발전 과제가 진행되고 있다는 것을 알고 있고, 산업부 회의(2014. 3. 28., 2014. 4. 1.), 관련 연구 용역 등을 통해 지열발전 과제로 인해 유발지진이 발생한다는 내용을 규모 3.1 지진 발생 보고 이전에 보고받았으므로 규모 3.1 지진 발생 보고 당시 유발지진인지 여부를 점검하여야 했으며, ㉢ ☆☆가 지진 발생 보고 공문에 해당 지진이 유발지진인지 여부가 명

확하지 않은 점은 있으나 해당 공문에 “미소진동 관리 신호등 체계”가 포함되어 있고, 지진 발생 이후 “미소진동 관리 신호등 체계”에 따라 조치하고 있다고 기재되어 있는 점 등을 고려할 때 수리자극과의 연관성을 의심할 수 있었으며, ④ 산업부가 지진 발생으로 피해가 발생하지 않았는데도 ☆☆가 “신호등 체계”에 따라 지진 발생 보고를 한 이유 등에 대해 ☆☆에 정확히 확인하거나 예기평에 확인하도록 지시하지 않은 점 등을 고려할 때 산업부의 주장은 책임을 회피하는 것으로 판단된다.

④ “한국 지열부존 현황 및 지열자원 평가” 연구 용역결과보고 검토 부적정

산업부는 “한국 지열부존 현황 및 지열자원 평가” 연구 용역에 스위스 바젤 등 해외 EGS 현장의 사례 등이 포함되어 있으나 해당 연구 용역은 국내 지열 부존량을 산출하는데 그 연구 목적이 있고, 효율적인 지열 저류층 생성을 위해 미소진동 모니터링이 필요하다는 것을 언급한 것이며, 해당 보고의 중간보고 시에도 미소진동 관리방안이 필요하다는 언급이 없어 규모 3.1 지진의 유발지진 여부 및 추가 지진 발생 가능성을 인지할 수 없었다고 답변하였다.

그러나 비록 해당 연구 용역의 주목적이 국내 지열부존량을 산출하는 것이지만 지열발전으로 유발지진이 발생할 수 있고, 유발지진 발생으로 지역주민에게 피해를 줄 수 있다는 해외 사례가 기재되어 있는 등 해당 연구용역에서 유발지진이라는 표현을 명시적으로 사용하고 있는 만큼 유발지진 여부 및 추가지진 발생가능성을 인지할 수 있었다고 판단되므로 산업부의 의견을 정당한 사유로 인정하기 어렵다.

조치할 사항 산업통상자원부장관은 앞으로 “MW급 지열발전 상용화 기술개발 과제”와 같이 재난위험이 있는 연구과제에 대해서는 재난위험 검토 등 안전 조치 업무를 철저히 하시기 바랍니다.(주의)