지반진동이 지상구조물 및 환경에 미치는 영향평가 -발파진동 사례를 통한 EGS 수리자극에의 활용- 이정인*, 민기복

Effect of Ground Vibration on Surface Structures and Human Environments -Application of Blasting Vibration to Induced Seismicity in EGS Hydraulic Stimulation- Chung-In Lee*, Ki-Bok Min

Abstract While microseismicity induced by hydraulic stimulation carried out for EGS is useful means in estimating the range of permeability increase, it also affect surface structures and environments. In order to establish a mitigation plan for microseismicity triggered by hydraulic stimulation, we reviewed world-wide guidelines on the impact of ground vibration on the surface structure and human environment by blasting. Case studies from Europe and USA on the microseismicity by hydraulic stimulation are presented and suggestions are made for the guidelines on ground vibration by hydraulic stimulation for the ongoing Pohang EGS project.

Key words EGS power generation, Hydraulic stimulation, Microseismicity, Blasting vibration, Peak particle velocity, Criterion for vibration

초 록 EGS 지열발전을 위한 수리자극시 발생하는 미소진동은 투수율 증가의 범위를 파악하는 유용한 수단이 되기도 하지만 지반진동으로 인하여 지상구조물 및 환경에 영향을 미친다. 본 연구는 EGS 지열발전의 수리자극에 의하여 발생하는 미소진동의 안전관리 기준을 수립하기 위하여 지반진동이 건축구조물 및 인체환경에 미치는 영향과 각국의 허용기준을 발파진동을 중심으로 조사 하였다. 또한 유럽과 미국에서 지열발전의 수리자극에 의한 미소진동의 연구사례를 조사 검토하여 포항 EGS 수리자극에 의한 지반진동의 관리 기준에 필요한 자료와 그 대처방안을 제시 하였다.

핵심어 EGS 지열발전, 수리자극, 미소진동, 발파진동, 최대지반진동속도, 진동의 허용기준

1. 서 론

지열에너지는 태양광이나 풍력에 비하여 기상 조건 등의 영향을 받지 않고 연중 24시간 생산 가능한 신재생 에너지 자원이다. 전통적인 고온 열수 지열발전은

화산지역에서 지하 2 km 내외의 깊이에서 온도 180℃ 이상의 증기를 끌어올려 발전기 터빈을 가동하는 방식이며, 이 방식은 심부 지층의 높은 온도(지열)의 근원이 되는 열원의 존재, 지열유체가 부존할 수 있는 투수성 구조, 그리고 충분한 지열수 유입량의 세 가지 조건을 만족해야 한다. 화산성 고온 지열지역이 아닌 우리나라에서도 심도 5 km에서 기대되는 최대 온도는 약 180℃ 이내로서 최근 선진국에서 개발 중인 인공 지열 저류층 생성 기술(EGS; Enhanced Geothermal System)을 통한 상업적 지열발전이 가능 한 것으로 보고 있다¹⁾. 인공 지열 저류층 생성기술(EGS)은 과거에 고온암체(Hot Dry Rock; HDR)를 대상으로 했던 기술이 좀 더 포괄적인

Received: Nov. 21, 2013

Revised: Dec. 20, 2013

Accepted: Dec. 23, 2013

*Corresponding Author: Chung-In Lee

(Tel) +82232851273, (Fax) +8228718938

E-Mail: cilee@snu.ac.kr

KISTI, 66 Hoegiro, Dongdaemun-gu, Seoul, 130-741, Korea

의미로 진보한 것으로 발전을 위한 온도는 충분하지만 유체가 없거나 투수율이 낮아 발전에 필요한 만큼의 압력을 가진 지열수 저류층이 부존하지 않을 경우에 인공적으로 투수율을 향상시켜 이를 상업적으로 발전이 가능한 시스템으로 만들어내는 기술이다. 즉 원하는 온도에 도달할 때까지 땅속 깊이 시추공을 굴착한 후에 강한 수압으로 암반을 자극 파쇄 하여 인공적으로 지열저류층을 생성시키고, 이를 통과하면서 열교환되어 온도가 높아진 유체를 또 다른 시추공을 통해 끌어올려 발전에 이용하는 방식이다.

현재 국내 포항에서 5 km 이내 심도에서 발전이 가능한 심부지열자원을 탐사하여 MWe급 EGS지열발전 기술개발에 관한 연구가 수행 중에 있으며 이 연구과제에는 심도 4~5 km의 시추공에서 저류층 생성을 위한 수리자극(Hydraulic Stimulation, 일명 수압파쇄(Hydraulic Fracturing)란 용어도 혼용되나 본고에서는 암반의 초기응력측정을 위한 수압파쇄와 구별하고 수리전단에 의한 투수율 증가를 포괄하는 개념으로 수리자극을 사용한다) 기술의 연구도 포함되어 있다. 인공 저류층 형성을 위한 수리자극에서는 단층 등의 불연속면에서 발생하는 미소진동(Micro-Seismic Event)에 의한 지반진동의 피해가 발생할 수 있으며 실제로 스위스 바젤 지열발전 프로젝트에서는 수리자극에 따른 미소진동으로 인해 프로젝트가 중단된 사례도 있다²⁾.

한편 우리나라는 1970년대 후반부터 서울시 지하철, 지하 유류비축기지, 지하 양수발전소, 고속전철 및 도로 터널, 도심지 고층건물 지하 터파기 공사 등이 활발해지면서 발파진동에 의한 지상 구조물과 환경피해와 안전발파 설계에 관한 연구가 많이 수행되어 이들 공사가 원활히 수행 되는데 크게 기여 하였다³⁻¹⁸⁾.

따라서 이 연구에서는 인공 저류층 생성을 위한 수리자극에 의한 지반진동이 지상구조물 및 환경에 미치는 영향을 발파진동의 사례를 중심으로 검토하고 그 활용 대책을 논의 하였다.

2. 지반진동이 지상 시설물 및 인체 환경에 미치는 영향

2.1 발파진동, 자연지진 및 EGS 수리자극에서 발생하는 진동의 특성

지반진동의 발생원은 다양하다. 우리생활의 주변에는 발파작업을 위시하여 항타, 지반타격, 굴착 등의 건설공사에 의한 대체로 지속시간이 짧은 진동과, 차량, 철도 운행에 따른 교통진동, 각종산업기계의 운전에서 발생하는 지속시간이 긴 산업진동 등이 있다. 이러한 인공적인 지반진동 이외에도 자연지진에 의한 진동의 피해가 있다.

이 연구에서는 그 대상이 되는 EGS 수리자극에서 발생하는 지반진동을 성질이 가장 유사한 발파진동과 자연지진 진동과 비교하여 Table 1에 나타내었다.

발파작업에는 그 규모에 따라 노천채광 발파와 과거 구소련이나 중국에서 산악지대의 댐 건설에 사용되었던 챔버 브라스팅, 지하핵실험 등의 대규모 발파에서부터 지하철, 고속철도 터널, 도심도로터널과 터파기 발파, 건물해체 발파 등 도심건물 근접발파 등 다양하다. 그러나 지하 핵실험을 제외한 대부분의 발파진동은 지진이나 EGS 수리자극 진동에 비하여 진원이 지표 또는 깊이 않은 곳에 위치하는데 비하여 자연지진은 지하 수 km 이상, EGS 수리자극의 경우 지하 2~5 km 심부에 위치한다. 따라서 발파진동의 경우 진동의 전파경로가 표토 또는 한두 층 암반을 경유하는 짧은 거리인데 비하여 자연지진의 경우 여러 층의 암반을 경유하는 긴 거리이며 EGS 수리자극 진동은 그 중간 거리이지만 발파진동에 가깝다. 진동 주파수, 진동지속시간, 진동파형의 경우에도 발파진동이 수십 Hz에서 수백 Hz의 고주파로 지속시간이 0.5~2초 내로 짧고 파형이 사인파에 가까운 비교적 단순한 파형인데 비하여 지진파의 경우 주파수 0.1~수 Hz 저주파로 지속시간이 수 초 또는 10 초 이상으로 길고 파형은 복잡하다. EGS 자극에서 발생하는 진동의 경우 역시 진동 주파수, 지속시간 및 파

Table 1. Comparison of vibration by blasting, earthquake and EGS hydraulic stimulation

구분	발파진동	자연 지진	EGS 수리자극
에너지원	화약	지각 변동	수압파쇄
진원 깊이	지표 또는 깊이 않은 지하	지하 수 km 이상	지하 2~5 km
전파 경로	표토층 또는 한 두층 암반	여러 층의 암반	한 두층의 암반
진동 주 주파수	수십 Hz~수백 Hz	수 Hz 또는 그 이하	수십 Hz 또는 그 이하
진동 지속 시간	0.5~2초 이내	수초 또는 10초 이상	발파진동과 자연지진의 중간
진동의 파형	비교적 단순	복잡	발파진동과 자연지진의 중간

Fig. 1. Typical coal mine blast vibration time histories⁹⁻²⁰⁾

Fig. 2. Blasting vibration compared to nuclear and earthquake motions²⁰⁾

형이 발파진동과 지진 진동의 중간에 속하나 대규모 심부 발파진동에 가까울 것으로 판단된다.

Fig. 1은 대표적인 노천채굴 석탄광의 발파진동 기록과 주파수 분포를 보여주며 Fig. 2는 지진 진동기록과 이에 대비하여 건설공사 발파와 지하핵실험 발파진동 기록을 보인 것이다. Fig. 3은 건설발파와 노천채굴 발파의 탁월 주파수대역을 보여주고 있다.

Fig. 1과 Fig. 2에서는 진동시간 이력곡선에서 가장 중요한 조건인 최대진폭, 주 주파수의 주기 및 진동지속시간이 표시 되어 있다.

Table 2는 진동의 성분 표시 및 단위를 나타내었다. 일반적으로 발파진동은 시간-변위곡선을 사인함수로 표시할 수 있고 다음 식으로 표시할 수 있다.

$$u = U \sin(2\pi f t + \theta) \quad (1)$$

여기서 U 는 최대변위, f 는 주주파수, θ 는 위상차를 나타낸다. 최대 진동변위, 속도 및 가속도는 다음 식으로 표시 할 수 있고 주파수에 의하여 상호 변환 할 수 있다.

Fig. 3. Predominant frequency histograms at structures of concern²¹⁻²²⁾

Table 2. Units of vibration

성분	기본단위	참고
변위	cm, mm, μm	$\mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m} = 10^{-3} \text{ mm}$
속도	cm/s, mm/s	1 cm/s = 1 카인(kine)
가속도	cm/s^2 , m/s^2	1 gal = 1 mm/s^2 1 G = 980 $\text{cm/s}^2 \approx 1000 \text{ gal}$
주파수	Hz	1 Hz = 1 cycle/s(cps)

$$U = u_{\max} \quad (2)$$

$$V = \frac{dU}{dt} = 2\pi f t_{\max} = 2\pi f U \quad (3)$$

$$A = \frac{dV}{dt} = 2\pi f \frac{dU}{dt} = 4\pi^2 f^2 U \quad (4)$$

여기서 U, V, A는 각각 진동변위, 진동변위속도, 진동변위가속도의 최대값을 나타낸다.

다음에 설명 하지만 발파진동의 크기와 피해를 주로 최대지반진동속도(Peak particle velocity 일명 Peak Ground Velocity(PGV) 라고도 한다)로 나타내는데 비하여 자연지진은 속도와 진동가속도를 기준으로 많이 표시한다. EGS 수리자극 진동의 경우는 양쪽을 같이 사용하고 있다.

한편 자연지진의 경우 지진의 크기를 나타내는 척도로서 규모(Magnitude)와 진도(Seismic Intensity)가 사용된다. 규모는 진원에서 방출된 지진에너지의 양을 나타내며, 지진계에 기록된 지진파의 진폭을 이용하여 계산한 절대적인 척도이다. 반면 진도(震度)는 어떤 한 지점에서의 인체 감각, 구조물에 미친 피해 정도에 의하여 지진동의 세기를 표시한 것으로 관측자의 위치에 따라 달라지는 상대적인 척도이다.

진도는 지진의 규모와 진앙거리, 진원 깊이에 따라 크게 좌우될 뿐만 아니라 그 지역의 지질구조와 구조물의 형태에 따라 달라질 수 있다. 국제적으로 규모는 소수1위의 아라비아 숫자로 표기하고 '진도'는 정수단위의 로마 숫자로 표기하는 것이 관례이다. 예를 들면 규모 5.6, 진도 IV 이다. 규모는 통상 리히터 규모를 사용하는데 1935년 미국의 지진학자 C. Richter가 캘리포니아 주 남부지방에서 발생한 지진의 통계적 연구를 수행할 때 지진의 크기를 나타내는 척도의 필요성을 느껴 다음과 같이 지진규모를 정의하였다. 즉, '진앙거리 $\Delta = 100 \text{ km}$ 인 관측점에서 우드-앤더슨(Wood-Anderson)식 지진계(고유주기: 0.8초, 배율: 2800배)의 기록지 상에 나타난 최대진폭 A를 μ 단위로 측정하여 그 상용대수를 취한 것'이다. 그러나 모든 지진에 대하여 100km 떨어진 곳에 항상 지진계가 있을 수 없으므로, 실제로는 다음 식에 의하여 국지지진규모 M을 계산하게 된다. 관계식은 다음과 같다²²⁾.

$$M = \log A + \log B \quad (5)$$

이 식에서 $\log B$ 는 거리 Δ 의 함수로서 100 km의 경우, 지진규모는 0이 되며, 100 km가 아닌 곳에서 관측된 지진의 진폭을 보정하는 항이다. 한 지진에 대하여 여러 관측소의 지진기록을 이용하여 규모를 산출하여 보면, 그 값이 서로 일치하지 않는 것이 보통이며, 이 경우 산술평균치가 규모로서 채택된다. 지진의 <규모(M)>에 따른 지진파 에너지(E)는 다음 식과 같은 관계가 있다²²⁾.

$$\log E = 12.24 + 1.44 M \quad (6)$$

Table 3. Modified Mercalli Intensity, peak ground acceleration(PGA) and peak ground velocity(PGV) by USGS²²⁾

Instrumental Intensity	Acceleration (%g)	Velocity (cm/s)	Perceived Shaking	Potenrial Damage
I	< 0.17	< 0.1	Not Felt	None
II III	0.17 - 1.4	0.1 - 1.1	Weak	None
IV	1.4 - 3.9	1.1 - 3.4	Light	None
V	3.9 - 9.2	3.4 - 8.1	Moderate	Very Light
VI	9.2 - 18	8.1 - 16	Strong	Light
VII	18 - 34	16 - 31	Very Strong	Moderate
VIII	34 - 65	31 - 60	Severe	Moderate to Heavy
IX	65 - 124	60 - 116	Violent	Heavy
X+	> 124	> 116	Extreme	Very Heavy

규모 1.0의 강도는 60톤의 TNT의 힘에 해당하며 규모가 1.0 증가할 때마다 에너지는 약 30배씩 늘어난다. 규모에 따라 인간이 느끼는 정도는 다음과 같다.

- 1) 3.5미만 : 거의 느끼지 못하지만 기록된다.
- 2) 3.5-5.4 : 가끔 느껴지고 미약한 피해 (창문 흔들리고 물건 떨어짐)
- 3) 5.5-6.0 : 건물에 약간의 손상이 온다.(벽 균열, 서있기 곤란)
- 4) 6.1-6.9 : 사람이 사는 곳이 파괴될 수 있다.(가옥 30% 이하 파괴)
- 5) 7.0-7.9 : 주진, 큰 피해를 야기한다. (가옥 전파, 교량 파괴, 산사태, 지각 균열)
- 6) 8혹은 그 이상 : 거대한 지진, 모든 마을이 파괴된다.

한편 진도란 특정장소에서 감지되는 진동의 세기로 하나의 지진은 규모는 같으나 진도는 장소에 따라 달라질 수 있다. 진도는 진앙으로부터의 거리, 지표의 성질, 구조물의 특성 등에 큰 영향을 받기 때문에 실제 지진의 크기를 정확하게 나타내는 수단은 되지 못하고 지진계의 기록을 얻을 수 없는 경우나 역사 문헌에 기록되어 있는 지진의 크기를 결정하는 데 이용된다. 그리고 진도는 각 나라의 사회적 여건과 구조물의 차이점을 고려 설정하는 것으로 세계적으로 통일되어 있지 않으며 나라마다 실정에 맞는 척도를 채택하고 있다.

일본에서는 JMA Scale (Japanese Meteorological Agency Scale)²³⁾, 미국에서는 MM Scale (Modified Mercalli Scale, Table 3 참조), 유럽에서는 로시-포렐 Scale (I-X), 그리고 동유럽에서 구소련을 중심으로 발달한 MSK Scale등이 있다.

2.2 발파진동에 의한 건축물의 피해 및 각국의 허용 기준

지반진동에 의한 피해는 다양 하지만 주로 건축구조물, 진동에 민감한 기기, 그리고 인체와 가축에 대한 피해의 종류와 피해내용을 요약하면 Table 4와 같다. Table 4에서 보는 바와 같이 피해의 종류는 그 대상에 따라 다양하기 때문에 진동의 허용기준을 정하는 것도 대상과 지역, 각국의 환경에 대한 사정에 따라 서로 다르다.

건축구조물에 대한 발파진동의 허용기준에 대한 각국의 기준들을 검토 하면 다음과 같다²⁴⁾. 미국의 경우 일찍부터 발파진동에 의한 지상 구조물의 피해와 한계에 대하여 미 광무국(U.S. Bureau of Mines)을 중심으로 광범위하고 체계적인 연구를 수행하였다. 1971년에 발표된 결과를 요약하면 구조물에 미치는 피해는 진동의 크기를 변위로 측정하였을 때 주파수와 밀접한 관련을 가지고 있는 것으로 나타났으며, 진동속도에 대해 나타낼 경우 구조물의 피해와 그 정도는 주파수의 영향을 거의 받지 않고 속도의 일정값으로 표시할 수 있는 것으로 보고되었다. 그 결과 진동속도 약 5 cm/s(2in/s)를 일반 구조물에 대해 피해를 일으키지 않는 안전한계로 제시하였고 13.7 cm/s에서 작은 피해(Minor damage), 19.3 cm/s에서 큰 피해(Major damage)가 발생한다고 보고하였다. 진동속도 5 cm/s의 손상기준은 현장에서 일반적으로 적용되어 왔고 많은 기관에서 법적인 규제 기준으로 받아 들여졌다. 그러나 이 기준의 적용에 대해서도 계속 피해 시비가 끊이지 않아 1974년 발파진동 해석에 대한 재해석이 시도되었다. 주파수에 대한 구조물의 반응특성 및 손상에 초점을 두어 추가로 측정을 실시하고 그동안의 자료를 확률적인 해석기법을 적용하여 분석한 결과를 1980년에 발표(RI8507)하였으며²¹⁾, Fig. 4와 Table 5와 같다. 그 결과에 의하면 주파수

Table 4. Damage by blast vibration^{20),24)}

대상	종류	적용
구조물	미관적 손상	단독주택 및 소규모 건축물의 내외벽의 미장재가 떨어져 나가거나 균열을 일으키는 정도로서 큰 어려움 없이 원상회복이 가능한 손상
	구조 손상	토목 건축구조물의 구조요소간 연결부위의 이탈 이완, 골격부재내의 균열발생 및 파단 침하 뒤틀림 등 내부 구조물의 구조적 안정과 기능에 심각한 위험이 되는 중대한 손상
기기	일시 오작동	충격진동 등에 의해 기기가 일시적으로 오작동 되는 정도로서 커다란 물적 작업 방해 피해를 유발하지 않는 정도의 피해
	품질 손상	기기 자체의 항구적 고장을 유발하는 정도는 아니나, 기기를 이용한 사람의 작업에 큰 지장을 주거나 기기의 처리 가공으로 얻어지는 성과 제품의 질을 크게 떨어뜨리는 수준의 피해
	고장	기기를 구성하는 주요 구성부품의 이탈, 접속부의 단절 파단을 초래하여 기기 자체의 수리를 요하는 중대한 피해
사람 및 가축	심리적 피해	신경이 쓰이기는 하나 참을만한 정도의 피해
	생산성 저하	참기 어려울 정도의 심한 불안감 및 불쾌감을 유발하는 정신적 피해를 일으키고 휴식여건 및 작업수행 성과에 영향을 미침으로서 근무효율 및 생산성을 크게 떨어뜨리는 수준의 피해. 가축의 경우는 불안을 유발하여 축산생산을 저하시키는 수준
	생리적 피해	의학적으로 사람 및 가축의 생리상태에 직접적인 영향을 미쳐 육체적 건강을 해치는 수준의 피해. 가축의 경우는 수태불능 등의 중대한 축산피해

Fig. 4. USBM blasting level criteria²²⁾

40 Hz를 중심으로 40 Hz 이상의 진동주파수를 갖는 발파진동에 대해서는 5 cm/s가 그대로 안전기준치로서 적용될 수 있으나 40 Hz 이하의 낮은 진동주파수를 갖는 발파진동에는 손상 받을 확률이 높아 안전기준을 1.2 cm/s로 낮추어야 할 것이 보고되었다.

미국의 노천채광청(OSM, Office of Surface Mining)은 노천 석탄채광작업에 대한 안전기준으로 Fig. 5 및 Table 6과 같이 좀 더 간단하고 실용적인 기준을 제시하고 있다.

미국은 주마다 적용 기준이 다르나 대부분 주저 가옥

Table 5. USBM blasting level criteria²⁴⁾

구조물 형태	안전 수준, in/s	
	f < 40 Hz	f > 40 Hz
Modern homes-drywall interiors	0.75	2
Older homes-plaster on wood lath for interior walls	0.5	2

Fig. 5. OSM vibration regulations (30 CFR Parts 715, 780, 816, and 817)²²⁾

에 대하여 OSM과 USBM의 제안 기준을 기초로 각 주 별로 허용 수준을 마련하고 있다. USBM 기준을 채택

Table 6. OSM vibration regulations (30 CFR Parts 715, 780, 816, and 817)²²⁾

발파지점으로부터의 거리, ft	최대지반진동속도 (in/s)	계측자료가 없을 경우 적용 scaled-distance factor
0 ~ 300	1.25	50
301 ~ 5000	1.0	55
5001 이상	0.75	65

Table 7. Vibration criteria in Halifax, Canada²⁵⁾

주파수 대역	최대지반진동속도 (cm/s)
15 Hz 이하	1.25
16 ~ 20 Hz	1.9
21 ~ 25 Hz	2.3
26 ~ 30 Hz	3.05
31 ~ 35 Hz	3.3
36 ~ 40 Hz	3.8
41 Hz 이상	5.0

Table 8. Vibration criteria in surface structure in Hamilton
annMuskoka, Canada²⁴⁾

주파수 대역	최대 진동 속도 (cm/s)
> 40 Hz	5.0
30 ~ 40 Hz	4.0
20 ~ 30 Hz	2.5
< 20 Hz	1.2

하고 있는 주는 알라바마, 메사츄세츄, 뉴저지주 등이며 OSM 기준을 채택하고 있는 주는 일리노이, 인디애나, 아이오와, 루이지애나, 메릴랜드, 몬타나, 뉴멕시코, 오크하이오, 펜실베이니아, 유타 주 등이다. 알칸사주와 사우스캐롤라이나주는 1.0 in/s의 허용수준을 설정하고 있으며, 켄터키주는 채석 및 건설작업에 2.0 in/s를, 노천 석탄광산에 OSM 기준을 적용하고 있다. 알래스카, 아리조나, 캘리포니아, 콜로라도, 플로리다, 아이다호, 네바다주 등은 규제 기준을 갖고 있지 않은 것으로 조사되었다.

캐나다의 경우 발파진동 허용 수준은 연방, 주 및 지방 자치단체에 따라 규제를 받고 있다. 브리티시 컬럼비아 및 앨버타주는 명시된 규제 기준은 없으나 광산 감독자가 상황을 판단하여 허용 수준을 설정할 수 있다²⁵⁾. 대부분 미국 광무국 및 노천채광청의 지침을 따르는 것이 일반적이다. 매니토바주는 관련규정(Manitoba Regulation 65/92)과 광산 및 광물자원법(Mines & Mineral Act)에 따라 규제를 받고 있다. 채석장 발파의

경우 주거용 건물에 대해서는 최대지반진동속도 1.2 cm/s, 기타 용도의 건물에 대해서는 5.0 cm/s를 허용 수준으로 하고 있다. 온타리오주의 경우 NPC 119를 비롯해서 여러 종류의 규제 기준이 있으며 광산 및 채석장 발파시 일상적인 계측작업이 이루어지지 않는 경우에는 1.0 cm/s를, 계측작업이 실시되고 있는 경우에는 1.25 cm/s를 허용 수준으로 설정하고 있다. 파이프라인과 관련 구조물 건설을 위한 노천 굴착시의 발파진동 허용 수준은 온타리오주 표준시방(Ontario Provincial Standard Specification, OPSS 515)에 따라 건물이나 구조물 인접 지반에서의 최대지반진동속도가 5.0 cm/s를 초과하지 않도록 하고, 콘크리트나 그라우팅 인접해서는 타설 후 60시간 이내에는 1.0 cm/s를 초과하지 않도록 규제하고 있다. 노바스코티아(Nova Scotia) 주의 헬리팩스(Halifax)에서는 Table 7과 같은 허용 수준을 설정하고 있다.

온타리오주의 해밀턴(Hamilton)시와 머스코타(Muskoka)시는 지상 구조물에 대해서 Table 8과 같은 기준을 설정하고 있으며 매설물 상부에서는 5.0cm/s를, 콘크리트의 경우 타설 후 80시간 이내에는 1.0cm/s를 초과하지 않도록 규제하고 있다.

독일의 경우 1970년대 German Standard인 DIN 4150 Part 3(1971)에서 발파와 같은 충격진동에 대한 건축물의 허용 수준을 설정하였고, 1986년 기존의 규격을 보완하여 주파수 특성을 고려한 수정안을 마련하였다(Table 9 참조) (DIN 4150 Teil3, 1986).

이 규정은 규제치 내로 준수될 때는 건물의 가치 하락을 가져오는 손상을 야기하지 않는 기준으로 볼 수 있으며 Table 9의 2항 및 3항에 해당되는 건축물에서 손상의 형태는 벽체 회벽에 균열이 형성되거나, 이미 존재하던 균열의 확대 또는 내력벽이나 천장에 금이 가는 정도로 정의하고 있다. Table 9의 기준 값은 피로 파괴를 고려하지 않은 수준의 충격 진동에 대한 것이며 높은 빈도로 발생하는 진동으로써 피로 현상을 일으킬 수 있거나 또는 연속적인 충격진동 및 구조물의 공진을 야기하는 진동은 정상 진동으로 취급하여 별도의 기준을 정하고 있다. Table에 제시된 기준 값을 지켰을 경우

Table 9. German damage criteria by short-term vibration (German Standard DIN 4150 Part 3, 1986)²⁴⁾

구조물 형식	진동속도, V_i , mm/s			
	계측지점 : 기초		계측지점 : 최상층 바닥면	
	주파수			
	< 10 Hz	10 ~ 50 Hz	50 ~ 100 Hz	모든 주파수대
상업지역 건물, 공장지역 건물 및 이와 유사한 건물	20	20 to 40	40 to 50	40
2. 주거용 건물 및 부속 건축물과 활용면에서 이와 유사한 건물	5	5 to 15	15 to 20	15
3. 진동에 민감하여 1항 및 2항에 해당되지 않거나 특별히 보존가치가 있는 건축물 (예 : 역사적 기념물)	3	3 to 8	8 to 10	8

- ① 진동속도 (V_i) : 건물기초 3방향 진동속도 중 최대치, 3 to 8 Hz 등의 진동속도는 비례적으로 변화하는 값.
 ② 측정방법 : 진동원과 직면한 건물의 가장 낮은 층의 기초내벽 또는 외벽, 지하실이 없는 경우는 지반 상부의 0.5 m 이하 구조의 3방향에 대하여 동시 측정, 건물 최상층 슬래브의 중앙 z-방향.
 ③ 100 Hz 이상의 주파수에 대해서는 50 to 100 Hz의 주파수 범위의 규제치를 적용.
 ④ 동적 허용응력이 정적 허용응력의 10% 미만일 경우는 fatigue factor 3을 곱하지 않음.
 ⑤ 슬래브(floor) 진동허용 규제치는 수직방향 최대지반진동속도 20 mm/s 이하.

Table 10. Swiss classification of surface and underground structures²⁴⁾

민감도 등급	고층 건축물	지하 건축물
(I) 극히 민감도가 낮음		철근 콘크리트 혹은 철제 교량 철근 콘크리트, 콘크리트, 축벽으로 된 지지벽 견고한 암석 혹은 잘 다져진 연암 내에 개착된 갱도, 터널, 지하공동, 수갱
(II) 조금 민감함	철근 콘크리트의 상용 및 생산업체 건물, 대개의 경우 외벽에 몰탈 칠이 없음 massive하게 지어진 사일로, 탑, 높은 굴뚝, 대개의 경우 몰탈칠, 철제 구조, 철책 기둥이 없음	연약암반 내에 지하 공동, 터널, 수갱, 관로 지하 주차 시설 지표 가까이 설치된 각종 관로 (가스, 수도, 하수, 케이블) 건설 축벽
(III) 보통 민감함	콘크리트, 철근 콘크리트, 인조 건축벽돌로 조적된 주거건물 조적 혹은 인공적 건축자재에 몰탈칠로 된 사무실, 학교, 병원, 교회 건물	저장소 주철배관 지하 동굴, 터널의 중간천장 및 차도용 포장 민감한 케이블
(IV) 대단히 민감함	회벽집 볼트식 구조물 (III) 등급의 건물이 개축 혹은 새로이 단장된 건축물 역사적 보호 건물	오래된 납 케이블 오래된 주철배관

진동에 의한 원인으로 가치를 감소시키는 피해는 발생하지 않으며, 그래도 피해가 관찰되었다면 이 피해의 결정적인 원인은 다른데 있는 것으로 간주한다. 변경된 주요 내용은 다음과 같다.

- 1) 구조물을 4가지 형태에서 3가지 형태로 분류하였다.
- 2) 모두 최대 입자 속도를 척도로 하였으나 벡터합 진동의 최대값에서 건물기초 3방향 진동 속도 중 최대치로 변경하였다.
- 3) 주파수 대역을 새로이 고려하였으며 경계 주파수는 10 Hz, 50 Hz, 100 Hz로 하였다.

- 4) 계측 지점은 건물 기초 또는 건축물 최상부층 바닥으로 하였다.
- 5) 주파수 대역에 따라 허용 수준을 0.2 cm/s ~ 4.0 cm/s로부터 0.3 cm/s~5 cm/s로 설정하였고 건물 최상부층 바닥에서의 측정값은 주파수에 관계없이 8 mm/s~40 mm/s의 허용수준으로 설정하였다.

스위스의 경우 1978년 제정된 기준에 이미 주파수 대역이 고려되어 있었으나 1987년부터 도로교통위원회 산하 “기초 및 기초 지층(VSS)”전문위원회가 개정을 위한 작업을 시작하여 1992년 4월 Norm 640 312a를

승인 받았다.

Table 10 및 11에서 보는 바와 같이 새 규정에서의 특징은 고층 및 지하층에서의 “민감도 분류”이며 “빈도 분류” 및 진동 속도의 주파수에 대한 고려가 포함된 것이다. 이 규정의 적용 분야는 발파에 의한 진동, 기계 진동, 모든 건설 장비 진동 및 도로와 철도 교통 진동들이 건물에 미치는 사항이며 진동 영향이 인간, 기초, 건물 안에 있는 기계 등에 미치는 것을 포함한다. 주파수가 8 Hz 이하일 때는 보다 더 낮은 기준치를 적용하고 있다.

이 규정에서는 민감도로 네 등급을 설정했고 고층과 지하층을 구분하였다. 분류에서 결정적인 기준이 되는 점은 구조물 각 부재의 민감도로써 건축 구조 양식 및 기타 요소, 예를 들어 건축 자재, 건물 상태, 외벽 처리, 회칠 등으로부터 정해지는 것이다. 또한 진동의 빈도수에 따른 진동 영향을 세 등급으로 나누어 가끔씩, 즉 조사하는 평가 시간 간격에서 영향수가 1,000보다 훨씬 작을 때와 자주, 계속적, 즉 영향수가 100,000보다 훨씬 많을 때로 구분하고 있다. 주요 변경 내용은 다음과 같다.

- 1) 변경 전 4가지 등급으로 구분한 구조물의 형태는 변경 후에도 그대로 유지하였으나 민감도 등급을 부여하고 등급별 건축물을 지상 및 지하 구조물로 구분하였다.
- 2) 교량, 터널, 지하 강도, 수갱, 지하 저장소, 배관, 케이블 등의 구조물 및 시설물을 고려하였다.
- 3) 진동의 빈도수에 따른 진동 영향을 세 등급으로 구분하는 빈도 등급을 부여하였다.
- 4) 주파수 대역은 개정 전 10, 60, 90 Hz 경계에서 개정 후 8, 30, 60, 150 Hz로 변경하였다.
- 5) 주파수 대역 및 빈도수에 따라 허용 수준을 개정 전 0.8 cm/s~4.0 cm/s로부터 개정 후 0.15 cm/s~9 cm/s 범위로 하였다.

영국의 경우 영국기준(British Standard)인 BS7385 Part 2(1993)에 발파를 포함한 다양한 진동원에 의한 건물의 손상 발생 가능성을 평가하는 지침을 제공하고 있다²⁶⁾. 이 기준은 미광무국 등 국외 사례와 영국 내의 광범위한 사례를 분석하여 작성하였다고 기술되어 있

Table 11. Swiss damage criteria by short-term vibration²⁴⁾

민감도 등급	빈도 등급	최대지반진동속도 (VR) mm/s 주파수 대역		
		< 30 Hz*	30 ~ 60 Hz	> 60 Hz**
(2) 작게 민감	가끔씩 자주 계속적	기준치: 민감도 등급(3)의 2배까지에 해당하는 값		
(3) 보통으로 민감	가끔씩 자주 계속적	15 6 3	20 8 4	30 12 6
(4) 극히 민감	가끔씩 자주 계속적	기준치: 민감도 등급(3)의 값과 1/2수준 사이의 값		

*) 8 Hz 이하의 주파수에서는 최저 기준치를 적용

**) 150 HZ 이상의 주파수일 경우는 더 큰 값의 기준치를 적용할 수 있다

Table 12. British damage criteria (British Standard, BS7385: Part 2, 1993)²⁴⁾

Type of Building	Peak component particle velocity in frequency of predominant pulse	
	4 to 15 Hz	15 Hz and above
Reinforced of framed structures Industrial and heavy commercial buildings	50 mm/s at 4 Hz and above	
Unreinforced or light-framed structures Residential or light commercial type buildings	15 mm/s at 4 Hz increasing to 20 mm/s at 15 Hz	20 mm/s at 15 Hz increasing to 50 mm/s at 40 Hz and above

NOTE 1. Values referred to are at base of the building.

NOTE 2. For line 2, at frequencies below 4 Hz, a maximum displacement of 0.6mm (zero to peak) should not be exceeded

으며 지침서를 요약하면 Table 12와 같다. 여기에 설정된 수준은 건물 벽에 실금이 발생하는 정도의 손상(cosmetic damage)에 대한 것이며 경미한 손상(minor damage)은 이 수준의 2배 이상, 건물의 구조적 손상이 발생하는 주요한 손상(major damage)은 4배 이상의 수준으로 평가하고 있다.

영국 기준의 특징은 다음과 같다.

- 1) 건물 형태를 2 등급으로 하였으며 건물 기초에서 측정한 진동의 세 성분 중 가장 큰 성분의 속도로 수준을 설정하였다.
- 2) 주파수 대역을 4, 15, 40 Hz를 경계로 하여 외관상의 손상(cosmetic damage)에 대한 허용 수준으로 1.5 cm/s에서 5 cm/s의 범위를 설정하였다.
- 3) 경미한 손상은 이 수준의 2배 이상, 주요한 손상은 4배 이상으로 평가하고 있다.

스웨덴의 경우 스웨덴 표준 SS 460 48 66(Vibration and shock-guidance levels for blasting induced vibration

limits)은 1989년에 승인되어 1991년 개정되었으며, 건축물 및 터널에 인접한 발파 작업에 대해 50여년의 경험적 결과에 기초하고 있다고 기술하고 있다²⁷⁾. 건축물에 영향을 주는 발파진동 수준을 결정하는데 큰 도움이 되며 인체 혹은 진동에 예민한 장비 시설은 고려하지 않고 있다. 세 성분의 진동속도 값을 제곱하여야 하며 건물의 기초지반에서 제곱하도록 규정한다.

허용 수준의 기준이 되는 값 v 는 다음 식과 같이 규정한다.

$$v = v_0 F_k F_d F_t \quad (7)$$

여기서 v_0 : 보정되지 않은 최대지반진동속도 (mm/s)

F_k : 건축물의 품질 계수로

$F_k = F_b F_m$ 즉 건물 계수와 건축재료 계수의積으로 표시

F_d : 거리 계수

F_t : 발파작업의 작업 기간을 표현하는 계수

Table 13. Calibration factors for particle velocity in Swedish standard²⁷⁾

항목	조건	계수
최대지반진동속도, v_0 (mm/s)	다져지지 않은 토질(빙퇴석, 모래, 흙)	18
	다져진 토질, 세일, 연약 석회석질	35
	화강암, 편마암, 석회암, 규암, 사암, 휘록암	70
건축물 계수, F_b	1등급: 중량급 건축물, 교량, 부두, 민간방호용 구조물	1.70
	2등급: 산업 및 상업용 건물	1.20
	3등급: 주거용 건물	1.00
	4등급: 고가아치 또는 스패이 큰 민감한 건물, 교회, 박물관	0.65
	5등급: 상태가 좋지 않은 역사적 건축물	0.50
건축재 계수, F_m	1등급: 보강 철근 콘크리트, 철골	1.20
	2등급: 무근 콘크리트, 벽돌	1.00
	3등급: 경량 골재 콘크리트	0.75
	4등급: 인조 석재 벽돌	0.65
공사기간 계수, F_t	터널 굴착, 도로 굴착을 위한 발파 등 건설 작업	1.0
	채석, 광산 작업	0.75 ~ 1.0

Table 14. Australian damage criteria during construction work (Australian Standard AS 2187.2, 1993)²⁴⁾

건물 형태	진동 속도, V_p (cm/s)
유적, 문화재, 특별한 가치가 있는 건물	0.2
2. 주택, 저층 주거용, 아래 3 항에 포함되지 않는 상업용 건물	1.0
3. 상업용 및 산업용 건물 또는 RC 구조물 또는 철골 구조물	2.5

허용수준을 결정하는 인자들의 값은 다음의 Table 13에 의해 결정하여 계산된다.

스웨덴 기준의 주요 특징으로써 다른 기준들과 차이점은 다음과 같다.

- 1) 건축물의 기초 지반의 형태를 3종류로 구분하여 고려하고 있다.
- 2) 건축물의 부재 종류를 4종류로 구분하여 고려하고 있다.
- 3) 지반에 따라 감쇠하는 특성을 거리계수를 이용하여 반영하고 있다.
- 4) 공사기간을 고려하고 있다.

호주의 경우 호주는 관련 기관 및 작업 형태에 따라 다양한 기준들이 적용되고 있지만 가장 표준화된 기준으로 호주표준 (Australian Standard) AS 2187.2 (1993)에 각종 건설 작업 시에 표준이 되는 허용 수준이 설정되어 있다(Table 14 참조). 이 기준은 건물 형태를 3등급으로 하여 주파수에 관계없이 0.2 cm/s에서 2.5 cm/s의 범위를 허용 수준으로 설정하고 있으나 현재 주파수를 고려한 기준으로 개정 중에 있다²⁸⁾.

퀸즈랜드주의 경우에는 주파수 특성을 고려하여 35 Hz 이상의 경우 최대지반진동속도 2.5 cm/s, 35 Hz 이하의 진동에 대해서는 1.0 cm/s의 허용 수준을 적용하고 있다.

2.3 지반진동이 인체 및 가축에 미치는 영향

Fig. 6은 지반진동에 대한 인체의 감응곡선을 나타낸 것으로 동일 지반진동속도에서도 노출시간에 따라 인간의 감응정도가 다르다는 것을 알 수 있다. 즉 진동의 지속시간이 길면 진동을 인지하거나 불편을 느끼는 진동속도 값이 낮아 민감하게 느끼는 데에 비하여 발파진동에서와 같이 진동의 지속시간이 일초이내의 짧은 시간에서는 훨씬 높은 진동속도에서도 불편을 덜 느끼게 된다. Fig. 6의 노출시간 일초이내의 파선으로 표시된 발파진동의 노출시간에서 진동을 확실하게 느끼는 지반 진동속도는 약 10 mm/s이며, 25 mm/s에서는 진동에 노출된 사람의 약 50%가 진동을 강하게 느끼는 것으로 보고되고 있다²⁹⁾.

우리나라에서는 인간 뿐만 아니라 가축에 대해서도 발파진동 및 소음의 피해에 대한 기준에 제시된 적이 있는데 젓소, 한우, 돼지, 닭, 개, 사슴, 곰, 염소 등에 대하여 유생산성저하, 성장지연, 유산 혹은 사산, 번식효율저하, 폐사율증가, 산란율 저하, 수태율저하, 녹용생산성저하 등 다양한 요인에 대하여 0.01-0.02 cm/s,

Fig. 6. human perception curve versus exposure time to vibration^{21),29)}

0.02-0.05 cm/s, 0.05-0.1 cm/s, 0.1-0.5 cm/s, 0.5-1.0 cm/s 등 다섯 구간의 진동속도에 대하여 피해정도를 산정하였다³⁰⁾. 세계적으로 아직 발파진동이나 소음이 가축의 생체에 미치는 영향에 대하여 조사연구 된 보고는 별로 없고 이 자료가 유일하다. 실제로 이 기준은 실제 고속철도 터널 공사나 건설 공사의 축산농가의 피해 보상에 많이 활용 되었다. 그러나 저자의 견해로는 가축의 경우도 인체에서와 같이 진동 주파수에 크게 영향을 받을 것으로 생각 되며 여러 종류 가축의 생체 반응을 여러 단계의 진동속도에 대하여 정량화 시킬 수 있는지에 대하여 많은 의문의 여지가 있다.

3. 유럽과 미국의 지열발전 프로젝트에서 발생하는 미소진동에 대한 연구와 대처

3.1 유럽의 지열발전 프로젝트에서 미소진동발생에 대한 조사연구 사례

Evans 등은 1969년부터 2008년 사이에 유럽 각국에서 수행된 41개 지열 발전과 이산화탄소 지하저장 프로젝트에서 수리자극의 압력수 주입에 의한 미소 지진 반응을 기술한 사례를 정리 조사 하였다³¹⁾. Fig. 7은 자연지진 발생 위험지수를 최고지반진동속도(peak ground acceleration, PGA)의 색깔로 대상 프로젝트의 위치와 함께 표시한 것이다.

이 자료는 총 41개 프로젝트의 심도, 압중, 응력상태, 자연지진 발생 위험지수(과거 50년간 지진발생 중 10%의 확률을 가진 최대진동 가속도의 중력에 대한 %), 주입형태(Stimulation, Injection test, Circulation), 최대유량, 최대압력, 총 주입유량, 주입정과 생산정의 간격 등의 자료를 정리하여 압력수 주입에 의한 미소진동 발

Fig. 7. Global seismic hazard map and location of injection sites for geothermal and CO₂ reservoirs³¹⁾

생 위험저동의 요인을 규명하기 위해 활용되고 있다. 그 결과 아래의 주요한 결론이 도출되었다.

1. 일반적으로 사암, 석회암 등 퇴적암 지역에서의 수리자극이 화강암, 현무암, 편마암 등의 결정질 암층에서보다 지진이 적게 발생한다.
2. 두 암반층 모두 주입정 부근에 수직 수평으로 상당한 거리로 수압이 침투할 수 있는 단층이 존재가 미소진동의 발생을 증가시키는 것으로 나타났다.
3. 결정질 암반에 주입되는 모든 경우 비록 피해가 없는 규모 일지라도 미소진동이 발생하였다.
4. 모든 결정질 암반은 주입에 의한 지진반응의 강도에 관계없이 한계응력 상태에 있는 것으로 판명 되었다.
5. 이들 자료는 한계응력상태가 지진을 발생하는 필요 조건은 되지만 충분조건은 아니라는 것을 제시한다.
6. 이 연구에서 고려된 자료는 보다 깊은 결정질 암층에 주입하는 것이 더 큰 규모의 지진을 일으키는 경향이 있다는 개념이 성립하기는 충분하지 않다.
7. 자료가 너무 적어 미소진동의 규모에 깊이와 유량의 양자의 영향을 평가하기 어렵다.
8. 자연지진의 발생이 낮은 곳, 즉 50년간 발생한 지진 중 최대 진동 가속도가 0.07 g 이상이 될 가능성이 10% 이하인 곳에서의 주입은 감지할 수 있는 진동을 일으키지 않는 것으로 나타났다.
9. 이 결과는 비록 데이터베이스가 한정 되지만, 0.07 g 이하의 낮은 자연지진 발생 지역에서의 압력수 주입이 감지되거나 피해를 주는 진동을 발생 할 가능성이 낮다는 유용한 지표가 될 수 있다. 그렇다고 높은 값이 반드시 높은 경향을 나타내는 것은 아니다.

이상의 중요한 결론은 포항 EGS지열발전의 수리자극의 지반진동 발생을 예측 하는데 큰 도움이 될 수 있다.

이들 41개 프로젝트 중 스위스 바젤 프로젝트의 EGS 수리자극에서 최대 진도 3.4의 미소진동의 발생으로 프로젝트가 중단 된 사례²⁾는 앞으로 우리나라 포항 프로젝트를 수행하는데 큰 교훈이 될 수 있다. 바젤지열발전 프로젝트에서 수립한 미소진동 안전 관리 시스템을 살펴보면 SED(Swiss Seismological Service)와 주 감독관청에서 측정한 정보를 기준으로 Magnitude는 2.3 미만에서부터 3.5초과까지의 5단계, 최대지반진동속도(PGV:Peak Ground Velocity)는 0.5 mm/s미만에서부터 5.0 mm/s초과까지의 4단계, 대중의 진동감지는 아무도 알지 못하는 상태부터 일반적으로 대부분 인지하게 되는 단계까지의 5단계 중 어느 한 가지라도 나타나면 정해진 절차에 따라 프로젝트 팀 및 감독관청에 대한 보고와 주민들에게 관련정보를 웹페이지와 SED경보시스템을 통해 언론에 공표하는 동시에 현장에서는 압력과 유량을 즉시 조절하고 모니터링을 강화하도록 매뉴얼화되어 있다²⁾. 이러한 관리 시스템의 최대 지반진동속도(PGV)의 분류기준은 앞장에서 설명한 스위스의 발파진동의 건축 구조물에 대한 허용 기준(Norm 640 312a)에 의하여 만들어 진 것을 알 수 있다. Table 11의 민감도(3)등급 건축물에 대하여 주파수 30 Hz 이하에서 빈도등급 자주의 경우 최대지반진동속도 허용 기준은 6 mm/s, 빈도 연속적 등급에서는 3 mm/s 이다. EGS 수리자극에서 발생하는 미소진동의 주 주파수대역에 대한 연구 자료는 갖고 있지 않으나 Table 1에서 설명한 바와 같이 자연지진의 주파수범위 0.1Hz~10 Hz, 대규모 노천채굴 발파에서 주파수범위가 약 10 Hz~40 Hz 임을 고려 할 때 그 중간 범위, 약 10 Hz~30 Hz로 추정 할 수 있다. 따라서 바젤 프로젝트의 미소진동 안전관리 시스템에서는 PGV의 최대허용기준을 5 mm/s로 하여 그 이상의 미소진동이 발생하면 주입을 중단하고 주입압을 최소압력으로 감소시키는 조치를 취하도록 되어 있다. 또한 사람이 진동을 거의 인지 할 수 없는 PGV 값, 0.5 mm/s 이하의 미소진동에서는 정상조업으로 압력주입을 계속하며 0.5 mm/s - 2.0 mm/s 범위에서는 압력주입은 계속하되 유량을 증가시키지 않으며 2.0 mm/s - 5.0 mm/s 범위에서는 주입유량을 감소시켜 수리자극압력 이하의 압력으로 유지하던지 압력 주입을 중단하는 조치를 취하도록 하였다.

3.2 미국 연방 에너지부의 지열발전 유발지진(Induced Seismicity)에 대한 대처

미국 에너지부(US Department of Energy)는 EGS 지

열발전을 개발하여 2050년에 미국 전기수요의 10%인 100 GWe의 지열 발전 계획(MIT 연구)을 수립하여 3800만 달러의 연구비를 투입하고 있다³²⁾.

에너지부 지열개발 부서는 1970년대부터 지열개발에서 발생하는 유발지진에 대한 연구를 해 오고 있다²⁾. 그 경과를 보면 유발지진은 인공지열발전과 자연 지열발전 모두에서 경험하고 있으며 유발지진 문제로 최근 사업이 중단 되거나 지연된 경우가 있었다. EGS 활동이 증가함에 따라 미소진동 발생이 해당분야 종사자에게는 물론 지역 주민에게도 문제가 될 수 있다는 점을 인식하여 2004년 IEA와 EGS와 관련된 환경문제를 다루는 국제협약에 참여 하였다.

Fig. 8은 1995년 11월부터 1997년 10월까지 Geysers 프로젝트의 수리자극에서 지진규모 2.0 이상의 유발지진의 발생을 보여주고 있다.

EGS 미소진동 발생의 가설요인으로 공극수압에 의한 유효응력의 변화, 열응력, 침하와 용기에 의한 체적 변화, 단층면의 화학적 반응, 응력 확산, 생산정 유발, 주입정 유발 등을 들고 있다.

2012년 발간된 EGS 지열발전 유발지진문제에 대처하는 규약이 미국 에너지부에 의해 발간되었으며 미소진동 대처의 단계를 다음과 같이 정리하고 있다³⁴⁾.

- 1단계: 사전조사실시(Perform a preliminary screening evaluation)
- 2단계: 지역주민들과의 대화 프로그램 실행(Implement an outreach and communication program)
- 3단계: 지반진동 및 소음에 대한 사전 검토 및 허용한계 설정(Review and select criteria for ground vibration and noise)
- 4단계: 모니터링 시스템 구축(Establish seismic monitoring)

Fig. 8. Induced microseismicity in enhanced geothermal systems³³⁾

5단계: 자연지진 및 유발지진에 따른 대한 피해 위험도 정량화(Quantify the hazard from natural and induced seismic events)

6단계: 유발지진에 따른 피해 확률 산정(Characterize the risk of induced seismic events)

7단계: 피해 확률에 기반한 예방계획 수립(Develop risk-based mitigation plan)

4. 포항 EGS 지열발전의 수리자극에 의한 지반진동의 안전관리 기준 제안

현재 국내 포항에서 5 km 이내 심도에서 발전이 가능한 심부지열자원을 탐사하여 MWe급 EGS지열발전 기술개발에 관한 연구가 수행 중에 있으며 이 연구과제에는 심도 4~5 km의 시추공에서 저류층 생성을 위한 수리자극(Hydraulic Stimulation) 또는 수압파쇄(Hydraulic Fracturing) 기술의 연구도 포함되어 있다. 포항 EGS 수리자극 대상 암반이 결정질 암석인 화강암 지층이므로 앞서 고찰한 유럽지역 41개 프로젝트의 사례 연구 결과에서 제시 된 바와 같이 결정질 암반에 주입 된 모든 프로젝트에서 비록 피해가 없는 규모 일지라도 미소진동이 발생하였다는 사실로 미루어 수리자극 시험을 수행하기에 앞서 이에 대비한 미소진동에 의한 지반진동의 안전관리 시스템을 마련하여야 할 것이다. Fig. 9는 부지주변 주요시설 및 마을까지의 위치를 보여주고 있다.

포항EGS 수리자극의 지반진동 관리지침 마련함에 있어 2장에서 설명한 발파진동과 EGS수리자극 지반진동의 진동특성의 비교 및 각국의 발파에 의한 지반진동의 허용 기준들이 중요한 자료가 될 것이다. 발파진동이 일반지상구조물에 대해 피해를 일으키지 않는 안전

Fig. 9. Surrounding areas for Pohang EGS site

Table 15. Suggested vibration guideline for EGS hydraulic stimulation in Pohang

진동의 기준범위	수리자극의 허용기준
최대 지반진동속도(PGV) < 0.5 cm/s	정상작업, 주입 계속
최대지반진동속도(PGV) < 0.5-1.0 cm/s	시추감독관에 통보 주입은 계속되되 유량은 증가시키지 않는다
최대지반진동속도(PGV) > 1.0 cm/s-2.0 cm/s	시추감독관에 통보, 주입 속도를 낮추어 주입정 압력을 수리자극압력이하로 유지 하거나 주입중단, 수리자극압력 감압
최대 지반진동속도(PGV) > 2.0 cm/s	시추감독관에 통보, 주입중단, 주입정 압력 최소로 유지

한계(damage/safety criterion)는 미국 광무국에서 발표한 5 cm/s(2in/s)를 기준으로 하여 지상 건축물과 시설의 종류, 발파작업 주변 환경 등의 변동요인과 이에 대한 각국의 환경질정에 따라 안전율을 고려한 허용기준을 설정하고 있어 나라에 따라 기준도 상이하고 기준을 적용하는 규정의 형태도 다양하다. 각국의 허용기준을 살펴보면 크게 나누어 미국의 기준(OMS)이 주파수 10 Hz 이상에서 3 cm/s-5 cm/s, 10 Hz 미만에서는 1.9 cm/s의 기준을 적용 하는데 비하여 독일과 스위스를 중심으로 한 유럽의 기준은 구조물의 종류를 세분하여 보다 보수적이고 엄격한 허용기준을 적용하고 있다. 이는 유럽의 도시들이 중세부터 건축된 오래된 성당, 보존가치가 있는 주거, 상업 건축물이 널리 산재해 있는 데다 비록 일반 주거상업건물 일지라도 전통을 중시하는 관습에 따라 재건축시 외관과 골격을 보존하며 내부를 수리한 지반진동에 취약한 건물이 많은 사실에 기인한 것으로 판단된다. 특히 스위스의 경우는 여기에다 세계제일의 환경관광지로서의 안전율이 포함되어 가장 엄격한 기준을 갖고 있다.

한편 국내의 발파진동에 대한 허용기준은 1980년대 초 서울시 지하철 터널굴착공사의 발파작업에 적용하기 위해 마련한 기준이 있다. 이 기준은 지하철 건설 초기에는 미국의 기준을 참고하여 준용하였으나 그 뒤에는 1970년대 제정된 독일의 DIN 4150을 기초로 제정되어 유사한 점이 많다. 이 기준은 문화재를 제외한 대상 건축물을 세 등급으로 분류하여 주파수에 관계없이 0.5 cm/s~4.0 cm/s의 진동속도를 허용하고 있다. 이는 도심지 지하철 건설에 적용된 기준으로 도심지 이외의 발파나 산악터널에 대하여 적용하는 것은 너무 보수적이어서 건설공사의 발파작업 규제가 심하여 공사 진행을 어렵게 하거나 피해분쟁이 발생하였을 때 보상평가가 과대 해 지는 등 많은 논란의대상이 되어 왔다. EGS 지열발전의 연구대상 지역인 포항 부지 주변은 ①전담 지대로서 한동대학교(700 m 거리) 이외에는 주요 민가나 건축물이 별로 없는 점과 ② 발파의 경우 지발당사 용화약량의 조절이나 무진동 폭제동을 사용하여 과도

한 허용기준에 대하여도 시공대안이 있는데 비하여 ③ EGS 수리자극에서는 기준을 엄격하게 할 경우 작업 중단 이외의 시공대안이 없다. ④ 스위스 바젤의 경우 과거의 지진이 많이 발생한 활성단층이 존재하고 도심지 부지에서 시공 된데 비하여 포항부지의 경우 그렇지 않다는 점 등을 고려 할 때 유럽의 독일이나 스위스의 기준보다는 미국의 허용기준을 적용하는 것이 보다 합리적이라 판단된다. 따라서 저자는 이상의 요소들과 전제조건을 가정하여 최대지반진동속도(PGV) 0.5 cm/s을 하한 기준으로 하여 그 이하에서는 수리자극의 정상 작업을 시행하고 PGV 2.0 cm/s을 상한으로 하여 그 이상에서는 수리자극의 주입을 중단 하고 주입공의 최소 압력으로 감압 할 것을 내용으로 하는 Table 15의 수리자극작업 내부 관리기준안을 참고로 제안한다. 다만 본 제안은 국내에서 처음 시행되는 EGS 수리자극의 기초 자료로만 의미가 있으며 추가적인 자료를 바탕으로 보다 엄밀한 기준이 제시되어야 할 것으로 생각된다.

이와 같이 발파진동의 허용기준을 자료로 EGS 수리자극의 지반진동 관리 기준을 만들 수가 있으나 발파진동과 EGS 수리자극의 진동관리 시스템은 서로 다르다. 즉 발파에 의한 지반진동이 ① 진동을 일으키는 에너지 원인 화약의 중량과 폭원과 시설물과의 거리를 정확하게 조절 할 수 있고 ② 안전 발파설계를 할 수 있는 지발당 최대 장약량(W)과 폭원으로부터 대상 시설물까지 거리(R), 최대 허용 진동속도(V)와의 설계경험식이 실증 확립 되어 있으며(식 (8)~(9)) ③ 사전에 같은 부지에서 수평거리와 소규모 장약량에 의한 환산거리에서 최대 진동속도를 측정하는 시험발파를 통하여 안전발파설계가 가능하며 ④ 컴퓨터 자동설계 상용 소프트웨어까지 개발되어 있다^{12-13),15)}.

$$V = K \left(\frac{R}{W^b} \right)^n \quad (8)$$

$$\log V = \log K + n \log(SD) \quad (9)$$

Fig. 10. Water pressure to cause slip on a fracture³⁵⁾

여기서 K 와 n 은 지질암반조건 및 발파조건 관련 상수, b 는 1/2 또는 1/3, $\frac{R}{W^b}$ 는 환산거리(SD)이다. 계측을 하지 않는 현장의 발파 설계 진동식은 자승근 환산거리를 사용할 경우와 삼승근 환산거리를 사용할 경우로 나뉘며 식 (10)~(11) 등과 같이 제안되고 있다⁶⁾.

$$V = 200 \left(\frac{R}{W^{1/2}} \right)^{-1.8} \quad (10)$$

$$V = 700 \left(\frac{R}{W^{1/3}} \right)^{-2.0} \quad (11)$$

이에 비하여 수리자극에 의한 유발지진(Induced Seismicity)의 지반 진동은 ① 발생 메카니즘이 확실하지 않아 에너지의 크기와 발생위치, 규모 등을 사전에 예측하기 어렵고 ② 사후 모니터링을 통하여 위치 규모 등이 파악 되나 ③ 제어방법이 수리자극의 주입압력과 유량으로 발생 에너지의 크기와 직접 관계가 없고 간접적인 매개변수이며 ④ 에너지원의 심도가 깊고 진동의 전파경로가 지하 수직으로 복잡하여 지진의 규모와 거리에 따른 진도와의 관계식을 시험 등으로 결정하기 어렵다.

Fig. 10은 초기응력 상태에 있는 암석 절리면에 공극 수압이 작용 할 경우 유효응력에 의하여 절리면에 미끄러짐이 발생하는 암석역학적현상을 도시한 것이다³⁵⁾.

이 때 유효응력의 원리에 의한 간단한 조건식은 깊은 시추공에 압력수를 주입하여 지진이 발생하는 현상을

설명하거나 활성단층 부근에서 인공 저류층 형성을 위한 수리자극에서 유발지진을 일으키는 현상을 설명하는데 적용 될 수 있으나 이 경우도 수리자극 암반의 초기응력, 단층의 방향, 마찰 특성을 알아야만 한다.

그러므로 EGS 지열개발에서는 ① 과거 최소 50년간 이상의 지진 발생기록을 검토하고 물리 및 시추탐사, 지질조사 등을 통하여 활성단층의 유무, 불연속면 발달 상황 등을 조사하고 ② 미소진동의 계측 시스템을 철저히 하여 불연속면을 따라 전파하는 인공 균열대 추적과 미소진동의 규모와 최대지반진동속도(PGV)의 크기를 실시간으로 계측하여야 한다. 또한 ③ 사전에 지역주민과의 소통체계를 구축하여 사후 소통을 원활하게 하며 ④ 사후 만일의 피해 조사에 대비하여 미리 영향권 내의 건물 및 시설(문화재, 병원, 주거, 상업 및 산업시설)의 균열 등 안전실태조사, 주민(임산부, 병약자), 가축 등의 실태조사 등을 해 두기를 제안한다.

5. 결 론

현재 우리나라에서는 MWe급 EGS지열발전 기술개발에 관한 연구가 수행 중에 있으며 이 연구과제에는 심도 4~5 km의 시추공에서 저류층 생성을 위한 수리자극기술의 연구도 포함되어 있다. 이 연구는 포항 EGS 지열발전의 수리자극에 의한 미소진동의 발생과 이에 의한 지반 진동의 안전관리 기준을 만들기 위하여 지반 진동이 지상 시설물 및 인체 환경에 미치는 영향, 유럽과 미국의 지열발전 프로젝트에서 발생하는 미소진동에 대한 연구사례를 주로 문헌조사 통하여 검토 분석하여 그 자료를 제시하였다. 즉 지반진동이 지상 시설물 및 인체 환경에 미치는 영향에서는 발파진동, 자연지진, EGS 수리자극 진동에 대하여 진동특성을 비교하여 EGS 수리자극 진동의 주파수, 진동파형, 지속시간 등이 발파진동과 자연지진의 중간에 속하여 발파진동의 최대지반진동속도(PGV)와 지진규모(Magnitude)를 수리자극 진동에 적용 할 수 있음을 입증하였다. 따라서 국내의 발파진동의 건축 구조물에 대한 허용기준을 상세히 리브하고 인체 및 가축에 미치는 영향에 대하여도 검토 하였다. 또한 과거 40년간 유럽 41개 지열 발전 프로젝트의 미소진동 발생 사례분석 연구결과와 미국 에너지부의 EGS 수리자극에 의한 유발지진에 대처하기 위한 2012년 규약에 대하여 검토하여 포항 EGS 수리자극의 안전기준 설정에 필요한 자료를 제시하였다. 이상의 검토를 통하여 포항 EGS 지열발전의 수리자극에 의한 지반진동의 안전관리 기준을 수립하는데 기초 자료 되는 몇 가지 중요한 사항, ① 수리자극 지반진동

의 허용기준 설정 ② 허용기준을 적용함에 있어 발파진동의 경우 안전발파 설계를 통하여 사전 대처가 가능하나 수리자극 진동의 경우 실시간 계측을 통하여 사후 안전관리의 중요성과 그 대처방안 등을 제안하였다.

사 사

이 연구는 한국과학기술 정보원이 수행하는 고경력 과학기술인 활용 지원 사업에 의하여 수행 되었다. 연구를 수행함에 있어 발파진동에 대한 각국의 규제기준 자료를 제공한 지질자원 연구원의 류창하 박사와 논문 편집에 도움을 준 서울대학교 박사과정 박보나 양에게 감사함을 표한다.

References

- NexGeo, 2012, MW scale geothermal power generation technology development, 1st stage report, Korea Ministry of knowledge and economy.
- Lee, S., 2013, Case study of microseismic management systems for Basel EGS project, Tunnels and Underground Space, J Kor Soc Rock Mech, 23(6).
- Ryu, C.-H. and Lee, C.-I., 1979, A study on the effects of the ground vibration due to blasting on the structures, J Kor Inst Mineral Mining Engineers, 16(1), 41-50.
- Ryu, C.-H. and Lee, C.-I., 1979, Ground vibration by instantaneous and MS delay blasting, Korean Inst Mineral and Mining Engineers 33th National Symp, 14-15.
- Lee, C.-I., Ryu, C.-H., 1992, Measurement and control of ground vibration from rock blasting, Proc. of the International Symposium on Impact Engineering, Sendai, Japan, Vol. 2, p. 710-715.
- Lee, C.-I., 1993, Safe blasting controlling blast vibration, air blast and flyrock, Civil Engineering, Korean Society of Civil Engineers, 41(1), 99-117.
- Lee, C.-I., Shin, I.-J., 1997, The Characteristics of Blast-Vibration in Tunnel Blasting and the Vibration Control by Delay Time, Asia-Pacific Vibration Conference '97, Kyongju, Korea, p. 1240-1245.
- Kim, K.W., Choi, Y.-M. and Lee, C.-I., 1999, Software development for automated tunnel blasting pattern design, 1999 National Symp Korean Society for Rock Mechanics, Seoul Nat'l Univ., 51-54.
- Shin, I.-J. and Lee, C.-I., 1999, Effect of blast ing vibration on curing lining concrete, KSRM blasting technology seminar, Seoul Nat'l Univ., 119-134.
- Shin, I.-J., Lee, C.-I. and Baek, J.-H., 2001, An experimental study on the effect of burden on the blast-vibration, J Kor Soc explosives and blasting engineering, 19(1), 53-62.
- Shin, I.-J. and Lee, C.-I., 2001, Effect of blast-vibration on the strength of curing lining concrete, ISRM International Symposium 2nd-ARMS 2001, Beijing (China), 597-600.
- Kim, T.-H. and Lee, C.-I., 2002, Quantification of parameters for automated tunnel blasting pattern design, 2002 KSRM Spring Symp, Seoul Nat'l Univ., 55-63.
- Lee, C.-I., Jong, Y.-H., Kim, T.-H., Choi, Y.-K. and Jeon, S., 2002, Development of an automated design program for tunnel blasting, Journal of the Japan Explosives Society, Vol. 63, No. 6, p.309-315.
- Jong, Y.-H., Lee, C.-I., 2004, Influence of geological conditions on the powder factor for tunnel blasting, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 41, No. 3, Pergamon Press, p. 461.
- Lee, C.-I., Jong, Y.-H., Jeon, S., Choi, Y.-K. and Kim, H.-S., 2005, The Computerized Design Program for Tunnel Blasting, Proc. of the 31th Annual Conference on Explosives & Blasting Technology, Orlando, USA, Vol. 1, p. 159-168.
- Jong, Y.-H., Lee, C.-I. and Choi, Y.-K., 2006, Stability assessment of an adjacent ground storage tank by blast-induced vibration, Trans Kor Soc Noise and Vibr Eng., 16(1), 19-26.
- Jong, Y.-H. and Lee, C.-I., 2006, Numerical simulation of gas flow within a radial fracture created by single-hole blasting, Tunnel and Underground Space, J Kor Soc Rock Mech, 16(5), 413-421.
- Jong, Y.-H., Jeon, S. and Lee, C.-I., 2006, Numerical simulation of fracture mechanism by blasting using PFC2D, Tunnel and Underground Space, J Kor Soc Rock Mech, 16(6), 476-485.
- Stagg, M.S. and Engler, A.J. 1980, Measurement of Blast Induced Ground Vibrations and Seismograph Calibrations, Report of Investigations 8506, U. S. Bureau of Mines, Washington, DC.
- Dowding, C.H. 2000, Construction Vibration, ISBN 0-9644313-1-9. pp. 28-36.
- Siskind, D.E., Stagg, M.S., Kopp, J.W. and Dowding, C.H. 1980, Structure Response and Damage Produced by Ground Vibrations from Surface Blasting, Report of Investigations 8507, U. S. Bureau of Mines, Washington, DC.
- Oriard, L.L. 2002, Explosives Engineering, Construction Vibrations and Geotechnology, International Society of Explosives, pp201-207, pp. 543-601.
- Japan Meteorological Agency, <http://www.jma.go.jp/jma/en/Activities/inttable.html>, visited 20 Nov 2013.
- Ryu, C.-H., 2005, International case study on the guideline of the blasting vibration and suggestion on Korean guideline, 3rd Hanwha technology symposium.
- Grogan, A., and McAnuff, P., 2005, Canadian Vibration and Airblast Regulations, 31st ISEE Symp., Orlando, p. 307-310.
- Farnfield, R., 2005, Regulatory Control of Blast Vibration Levels in the UK, 31st ISEE Symp., Orlando, p. 283-289.
- Holmberg R. and Jonson D., 2005, Swedish Standards for Ground Vibrations and Airblast, 31st ISEE Symp.,

- Orlando, p. 289-306.
28. Spathis, A., and Brodbeck, A., 2005, Future Directions in Vibrations and Airblast Control Within an Australian Regulatory Context, 31st ISEE Symp., Orlando, p. 263-275.
 29. Dowding, C.H., 2000, Construction Vibration, p. 366-377.
 30. Hwang, W.-S. et al., 1997, Damage on livestock due to construction works, Symp on Processing of livestock excretions and increased bulky feed, 141-183 (and supplementary material).
 31. Evans, K.F., Zappone, A., Kraft, T., Deichmann, N., Moia, F. 2012, A survey of the induced seismic responses to fluid injection in geothermal and CO₂ reservoirs in Europ, Geothermics, Vol. 41, pp30-54.
 32. US Department of Energy, <http://www.doe.gov/eere/geothermal-energy-glance-back-and-leap-forward>, visited 20 Dec 2013.
 33. Majer, E., Nelson, J., Robertson-Tait, A., Savy, J., and Wong, I., 2012, Protocol for addressing induced seismicity associated with Enhanced Geothermal System, US Department of Energy, DOE/EE-0662.
 34. Majer, E., 2009, Overview of induced seismicity in geothermal systems, http://esd.lbl.gov/FILES/research/projects/induced_seismicity/egs/primeregs.pdf, visited: 20 Dec 2013.
 35. Goodman, R.E. 1989, Introduction to Rock Mechanics, John Willey & Sons, pp 85-87.

이 정 인

1963년 서울대학교 광산학과 공학사
 1965년 서울대학교 대학원 광산학과 공학석사
 1974년 일본 토호쿠(東北)대학 공학박사
 1975년-2007년 서울대학교 공과대학교수

Tel: 02-3285-1273
 E-mail: cilee@snu.ac.kr
 현재 서울대학교명예교수 및 한국과학기술정보연구원 ReSEAT 전문연구위원

민 기 복

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

Tel: 02-880-9074
 E-mail: kbmin@snu.ac.kr
 현재 서울대학교 에너지자원공학과 부교수