

지열발전을 위한 지열정 굴착기법과 환경영향

정재형*

Drilling Techniques for Geothermal Well and Environmental Impacts

Jaehyeung Jeoung*

Abstract 국도가 좁고 천연자원이 부족한 우리나라에서 전기생산의 대부분을 원자력 발전에 의존하고, 화력발전을 많이 활용하는 것은 당연한 일이다. 그러나, 각종 신기술의 개발과 함께 신에너지원에 대한 가능성이 증대되고 있어 이에 대한 연구와 투자도 소홀히 할 수 없는 상황에 있다. 신에너지원으로 거론되는 여러 가지 대안 가운데 비교적 국내기술로 접근하기 쉬운 부분이 지열을 활용한 분야이다. 일본, 필리핀, 인도네시아와 같은 화산국은 물론이고 우리나라와 같이 활화산이 없는 나라에서도 대심도에서는 지열자원이 고르게 분포해 있을 것으로 추정되어 개발된 지열활용기술은 그 수요처가 상당히 넓다고 할 수 있다.

본 연구에서는 지열활용을 위하여 필수적으로 사용되는 지열정 굴착기법과 건설에 따라 우려되는 환경영향을 정리하였다. 지열활용에 사용되는 지열정의 종류를 파악하고, 그에 따른 굴착기술을 소개하였으며, 저비용 고효율 굴착을 위한 요소기술들을 정리하였다. 그리고, 국외의 자료를 통하여 지열발전 프로젝트에서 우려되는 환경영향을 조사하여 국내의 상황과 비교하여 고찰하였다.

Key words Drilling Technique(굴착기술), Geothermal Well(지열정), Environmental Impacts(환경영향), Drilling Design(굴착설계)

* 한국건설기술연구원 지하구조물연구소

■ E-mail : jjhcivil@kict.re.kr ■ Tel : (031)910-0378 ■ Fax : (031)-910-0211

subscripts

EGS : Enhanced Geothermal System
 지열정 : Geothermal Well
 생산정 : Production Steam Well
 환원정 : Injection Well
 공벽보호관 : Casing

1. 지열발전을 위한 굴착

기존의 화석연료 및 원자력에 의존하여 전기를 생산해오던 방식에서 다양한 형태의 에너지원에서 전기를 생산할 수 있는 사회적, 경제적, 기술적 여건이 마련되고 있다. 여러가지 대안 가운데 지구 자체의 에너지를 활용하고, 지역적 격차가 거의 없으며, 발전에 따른 부작용이 거의 없는 것이 지열을 이용한 발전이다.

지열발전은 지구의 열을 직접 또는 간접으로 이용하기 때문에 지표 수백m에서 수km까지 지열정을 굴착하여 활용한다. 이 굴착과정에서 지열발전소 건설에 소요되는 상당부분의 비용이 발생하며, 굴착과정의 성패가 지열발전에 영향을 크게 주게 된다.

1.1 굴착심도와 지열발전

지열발전을 열원의 이용형태와 굴착심도로 분류하면 Table 1과 같이 나타낼 수 있다. 굴착심도만으로 지열발전을 분류하는 것은 무리가 있으나, 지열발전에 이용하는 열원별 분포 심도가 대체적으로 일정하며, 깊이에 따라서 굴착비용이 증가하는 경향을 보이기 때문에 발전소의 건설비용 및 발전소의 규모를 굴착심도로서 판단하는 것이 어느 정도 가능한 일이다.

일반적으로 심도 2km까지의 굴착은 온천개발과 같은 분야에서도 이용되고 있어 지열발전을 위한 기술이라고 말하기 어렵지만, 2km 이상의 굴착은 지열발전을 위한 굴착시스템이 도입 또는 개발되어야 한다.

Table 1. 지열발전의 형태

이용형태	지열원	추출온도(°C)	굴착심도
천층수 직접이용	천층수, 지표수	30 ~100	~ 200m
열수직접이용	열수, 온천수	60~100	~ 2km
EGS	고온암체	70~300	2km ~

1.2 지열정의 종류

지열발전을 위해서는 지열정을 굴착하여 지열을 추출하는 시스템을 건설하여야 한다. Fig. 1은 EGS의 개요를 보여주고 있으며, 지열정의 종류와 경사굴착의 상황을 잘 알 수 있다.

지열발전에 사용되는 지열정은 Table 2에서 나타난 것과 같이 크게 4가지로 분류할 수 있다.

Table 2. 지열발전을 위한 지열정의 종류

분류	지열 정	일반적 직경(선단부)	
조사단계	조사정	소형	100mm 정도
		대형	220mm 정도
생산단계	생산정	220mm 정도	
	환원정	220mm 정도	
	관측정		

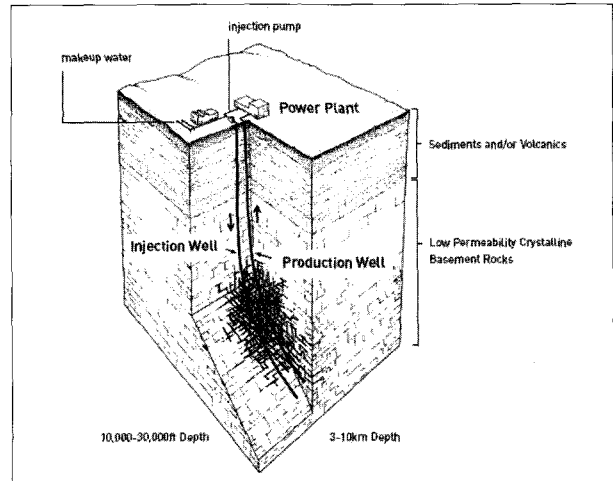


Fig. 1 EGS의 개요
(Renewable Energy and Power Department, 2006)

조사단계에서 사용되는 것이 조사정으로서, 지상으로부터 개략적인 조사로 열원이 분포할 것 같은 장소를 선정하고 발전소 설계 및 건설을 위하여 실제로 지하에 구멍을 파서 암석을 채취하고 온도를 측정하여 지열 자원의 질을 조사하는데 사용한다.

굴착하는 공경은 소형의 경우 직경 100 mm정도이고 대형의 경우 220mm 정도로서 실린더형태의 암석 샘플을 채취하면서 굴착한다.

소형을 사용한 조사는 심도 500m ~ 1500m 정도로서 조사 범위내에서 1~2km² 당 1개 정도 굴착하는 것이 일반적이다. 소형 조사정에서 채취한 코어를 분석하여 지표 조사에서 얻을 수 없는 데이터를 획득하여 지표조사와 비교 하므로서 보다 정확한 지하 구조를 알 수 있다.

지표에서는 측정할 수 없는 지하의 온도분포를 직접 측정하고, 균열 발달의 정도나 유체의 성질등도 조사할 수 있다.

대형 조사정은 조사를 마친후 생산정으로 활용하는 것을 염두에 두고 굴착한다. 발전소 건설을 위한 열원까지 직접적으로 굴착한 후에 증기나 열수를 분출시키는 예비실험을 수행하고 발전소를 건설할수 있을지에 대한 타당성을 최종적으로 조사하는 것이 목적이다.

타당성이 인정되어 발전소 건설이 확정되면, 생산정이나 환원정으로 활용하는 경우도 많다.

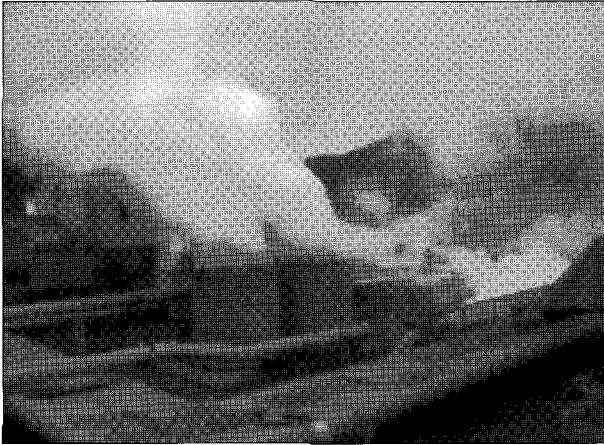


Fig. 2 지열 생산정 (일본)

생산정은 지하로부터 증기나 열수를 꺼내, 증기를 발전소에 공급하기 위한 우물로서 지하에서 분출되는 열을 손실 없이 지상까지 전달할 수 있도록 설계되어야 한다. 생산되는 증기의 압력을 조절하여 사고를 예방할 수 있는 설비가 부착되어야 한다.

환원정은 생산정에서 생산되어 발전에 사용된 열수나 증기의 응축수를 지하로 되돌려 순환시키기 위한 우물이다.

관측정은 지열발전이 이루어지고 주변 지하의 압력이나 온도를 장기간 관측하기 위한 시설이다. 지열발전은 자연을 그대로 이용하는 시스템으로서, 어느 정도의 불확실성을 가지고 있기 때문에 주변환경에 대한 지속적인 관측이 필수적이다.

조사정 및 폐쇄된 생산정, 환원정을 활용하는 경우가 많으며, 직경은 매우 다양하다.

1.3 공벽보호관

굴착작업시 굴착정의 공벽붕괴를 방지하고 지층수 및 기타 유체들의 유입을 막고, 생산정과 환원정의 열손실을 막기 위하여 공벽보호관을 설치하게 된다.

공벽보호관은 굴착설계에 있어서 핵심적인 사항으로 지역적인 지반의 특성에 좌우되며, 굴착비용의 상당부분을 차지하게 된다. 굴착심도가 깊어지게 되면 지표에서 대구경의 굴착이 이루어져야 되며 많은 수의 보호관이 필요하게 되어 총 굴착비용의 20%를 차지하는 경우도 있다.(강주명, 1994)

이론적으로 최종 선단의 직경 하나로 목표지점까지 굴착하는 것이 최소의 비용으로 간단하게 작업을 진행할 수 있으나

심도가 깊어짐에 따라 압력이 증가하고 지층의 강도변화가 불규칙해져 시추작업중에 공벽보호관을 설치하는 것은 불가능해진다.

공벽보호관을 유형별로 분류하면 Table 3과 같다.

Table 3. 공벽보호관의 유형 (강주명, 1994)

유형	설치심도	목적
전도보호관	수십m 이내	굴착장비의 기초 보강 및 지표미고결층 보호
지표보호관	수백m 이내	고결 연질암반의 붕괴방지 및 시추공의 마찰 손상 방지
중개보호관		과지압층 또는 팽창성 암반의 처리에 사용
생산정보호관	수km이내	목표심도에서 생산정을 보호, 라이너를 동시사용하는 것이 일반적
라이너		공벽보호관을 지표까지 연장하지 않고 중간에서 처리하는 보호관

1.4 시멘팅

시멘팅은 공벽보호관 설치작업과 함께 굴착작업의 중요한 일부이다. 시멘팅이 부적절하게 되면 가스의 누출등이 발생할 수 있으며 공벽보호관에 이물질이 유입되어 부식의 원인이 될 수도 있다.

시멘팅은 역학적으로 공벽보호관을 지층에 부착시켜서 굴착정의 붕괴를 방지한다. 그리고, 지층수에 포함된 황이나 염분 등 부식성 물질로부터 공벽보호관을 보호하고 지열정에서 생산된 증기 또는 열수의 외부 유출을 차단한다.

시멘팅은 기본적으로 시멘트등의 고화재를 화학반응시켜 목표강도와 차수성을 얻는 작업이므로, 지열발전과 같은 고온, 고압의 상황에서 원활한 반응을 얻기는 어렵다. 그러므로, 지열발전을 위한 시멘트 첨가제의 개발등이 필요하며, 신개념의 고화재 또한 개발될 필요가 있다.

2. 지열발전과 환경영향

지열 에너지는 지구의 온도를 활용하는 기술로서 크린에너지로 보아도 무방할 것이다. 그러나, 지열 에너지를 활용하기 위한 시설의 건설 또는 플랜트 자체가 유발하는 환경영향은 사전에 주의 깊게 고찰되어야 하는 부분이다. 본 원고에서는 국

외사례를 통하여 지열발전에 따른 환경영향을 정리하였다.

2.1 환경영향

환경영향이란 인간의 활동에 의하여 주변환경에 미치는 영향을 총칭하는 말로서, 우리나라는 환경영향평가제도를 운영하여 각종 사업에 대한 환경적 판단을 하고 있다. 환경영향평가시에는 평가항목을 사전에 정하여 평가하고 환경정책평가연구원 의견 제시하는 것이 일반적이다.

일정 규모이상의 사업에 대하여 환경영향평가를 실시하지만, 우리나라에서는 지열발전에 대한 구체적 사업이 없었기 때문에 환경영향평가의 사례는 없다.

일반적으로 지열이용에 따른 환경영향은 지열이용 규모에 비례한다고 알려져 있다.(Lunis and Brechenridge, 1991) Table 4는 지열 직접이용시 우려되는 환경영향의 가능성과 사안의 중대성을 정리하고 있으며, 바이너리 발전등과 같은 경우에도 적용 가능할 것으로 판단된다.

Table 4. 지열이용에 따르는 환경영향(Lunis and Brechenridge, 1991)

항목	발생빈도	사안의 중대성	국내발생 가능성*
공기오염	낮음	중간	
지표수오염	중간	중간	
지하수오염	낮음	중간	
지반침하	낮음	낮음-중간	낮음
소음공해	높음	낮음-중간	높음
지열정이 폭팔	낮음	낮음-중간	
문화/역사유적지에 영향	낮음-중간	중간-높음	높음
사회/경제적 문제	낮음	낮음	
화학적/열적오염	낮음	중간-높음	
고체폐기물 발생	중간	중간-높음	

* 저자 첨삭

우리나라의 경우 국토가 좁으며, 국민들의 환경에 대한 의식이 높기 때문에 미국과 같은 인구저밀도 국가들보다 작은 환경문제에도 사회적 이슈가 되기도 한다. 이러한 관점에서 소음문제와 문화/역사 유적지 문제는 우리나라에서 발생할 가능성이 크다고 할 수 있다. 특히, 소음관련 문제들은 최근 환경관련 민원의 대다수 건수를 차지하고 있는 실정이다. 그러나, 우리나라의 지질적 특성상 남부 일부지역을 제외하고 상당히 단단한 표토층을 가지고 있어서 지반침하 문제는 크게 발생되지 않을 것으로 판단된다.

2.2 지열발전에 따른 영향

앞 절에서 개략적으로 지열발전에 따른 환경영향을 정리하여 보았으며, 본 절에서는 조금 상세하게 환경영향 가능성을 정리하였다.

1) 온배수 문제

지열발전 시스템의 설계에 따라 온배수의 배출량이 다르겠지만, 얼마되지 않는 2-3°C의 지표수 / 바닷물의 수온상승이 발생한다면, 그 지역의 수생생태계에 미치는 영향은 크다. 온도 변화에 민감한 수생식물 또는 어류가 전멸하므로써 먹이사슬이 붕괴되기 시작하여 어업이나 양식업에 영향을 주는 경우도 발생한다.

배수를 냉각하여 방류가능하게 만드는 경우도 있으며, 주변의 생태계에 영향을 주지 않기 위해서 저장연못이나 냉각탱크를 거쳐서 처리하게 된다.(Lunis and Breckenridge, 1991).

2) 지형 훼손

지열 개발을 위해서는 진입도로를 개설한다든지, 지온의 변화 조사를 위한 조사정을 발전플랜트에서 상당히 떨어진 지역에 굴착한다든지 하여 지형을 훼손하는 경우가 발생한다.

Table 5. 지열 발전을 위한 필요 부지 면적 (Mary H. Dickson, Mario Fanelli)

굴착심도	현장 면적	비고
300-700 m	300 - 500 m ²	
2000 m	1200 - 1500 m ²	

지열유체를 옮기는 파이프라인이나 지열 이용 플랜트의 건설이 지형 변경이나 생태계에의 영향을 줄 수도 있으며, 그 지역의 경관이 바뀔수도 있다. 그러나, 각종 대규모의 파이프라인, 클링 타워등의 시설이 그 지역의 전원 풍경과 잘 어울리도록 설계한다면, 오히려 관광 명소가 되는 경우도 있다.

3) 대기 오염

지열 이용 플랜트의 열수나 증기등의 지열 유체에는 일반적으로, 이산화탄소(CO₂), 황화수소(H₂S), 암모니아(NH₃), 메탄(CH₄) 등의 가스 성분을 포함하고 있는 경우가 있으며, 온도에 의해서 용해도가 높아지는 염화 나트륨(NaCl), 붕소(B), 비소

(As), 수은(Hg)등이 포함되어 공기중에 배출될 수 있다. 반면, 아이슬랜드의 지역 난방에 이용되고 있는 지열유체의 경우에는 무공해에 가까운 현장도 있다. (Mary H. Dickson, Mario Fanelli)

초기의 지열발전 플랜트에서는 대기오염이 문제가 되는 경우가 있었으며, 황화수소 대표적 오염물이라고 할 수 있다. 사람이 악취를 느끼는 농도의 5 ppb 부터라고 알려져 있으며, 그것 보다 높은 농도가 되면 인체에의 영향이 나타난다고 알려져 있다. (Weres, 1984) 그러나 현재는 여러가지 방법에 의해 황화수소의 배출을 억제하는 것이 가능하다.

4) 수질 오염

지열 이용 시스템으로부터의 배수가 수질오염의 원인이 될 수 있다. 이용된 열수가 고농도의 붕소, 불소 화합물, 비소등을 포함한 경우는, 수질처리를 실시하거나 지하로 환원시킬 필요가 있다.

5) 지반 침하

지하수를 직접 이용하는 경우에 지하로부터 대량의 열수를 꺼내 사용하게되면, 지하수 차지하고 있던 부피만큼의 지반침하가 발생하는 경우가 있다. 이 경우, 지반침하는 비교적 넓은 범위에서 천천히 진행되어, 표면화할 때까지 수년 걸리는 경우도 있다. 심각한 경우에는 지반침하량이 10cm에서 1 m에 이르러, 지열 플랜트나 부근의 주택이 손상을 주는 경우도 있다. 이 때문에 대량의 열수를 꺼내는 경우에는 계획적으로 지반침하를 모니터링 할 필요가 있다. 우리나라의 경우 일부지역을 제외하고 지하수가 잘 발달해 있지 않아서 지하수를 직접이용하기 어렵다. 그리고 지표가 다른 외국도시들에 비교할 때 단단한 지질구조를 가지고 있어 다수의 지반침하 피해는 발생하기 어려운 것으로 판단된다.

6) 지진 유발 요인

일부 지역에서는 열수를 꺼내거나 환원하는 것이 지진의 원인이 되거나 지진의 발생 빈도를 높일 가능성이 있다. 그러나 이러한 경우 발생된 지진의 규모는 매우 작아서, 고정밀도의 지진계만이 검지할 수 있는 정도이다. 지열 이용이 대규모 지진 발생의 계기가 될 가능성은 매우 적으며, 현재까지도 그러한 사례가 보고된 적은 없다.

6) 소음공해

지열발전소에서 발생하는 노이즈가 인근 주민에게 소음공해를 유발시키는 경우가 있다. 지열 유체를 반송하는 파이프라인에서는 높은 주파수의 노이즈가 발생될 가능성이 있으며, 파이프라인의 분기점에서도 노이즈가 발생한다. 그러나, 일반적으로 이러한 노이즈는 환경기준치를 넘지 않는다. 지열발전소에서는 냉각탑의 팬, 증기 배출기, 터빈등이 주된 노이즈원 이다. (Brown, 2000) 소음공해는 소음원과 민원인의 위치관계에 많이 의존하게 되며, 우리나라와 같이 사업장과 민가가 인접해 있는 경우는 사업장에서 대단한 주의를 하여야 할 필요가 있다.

3. 결론

지열을 이용한 발전에 대한 관심이 증대하고 있는 상황에서 국내에서 기초단계인 지열발전에 대하여 국외자료등을 활용하여 지열정 굴착기술과 환경영향에 대하여 조사하였다.

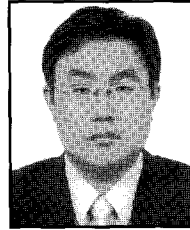
지열정 굴착기술에 대하여는 공벽유지공 및 시멘팅기술에 대한 개발이 필요할것으로 판단되었으며, 지열발전에 따른 환경영향에 대해서는 소음 공해 분야가 좁은 국토와 높은 인구밀도의 우리나라에서는 중요하게 다루어 질 부분으로 판단되었다.

References

- (1) 강주명, 1991, 석유시추공학, 서울대학교 출판부, pp.279 - pp.456
- (2) BROWN, K. L., 2000. Impacts on the physical environment. In: Brown, K.L., ed., Environmental Safety and Health Issues in Geothermal Development, WGC 2000 Short Courses, Japan, 43-56.
- (3) LUNIS, B. and BRECKENRIDGE, R., 1991. Environmental considerations. In: Lienau, P.J. and Lunis, B.C.,eds., Geothermal Direct Use, Engineering and Design Guidebook, Geo-Heat Center, Klamath Falls, Oregon, pp.437-445.
- (4) Renewable Energy and Power Department Idaho National Lab., 2006, "The Future of Geothermal Energy"

- (5) WERES, O., 1984. Environmental protection and the chemistry of geothermal fluids. Lawrence Berkeley Laboratory, Calif. ,LBL 14403, 44 pp.

정재형



1994년 부산대학교 토목공학 공학석사
2003년 일본 교토대학교 토목공학 공학박사
2004년 일본 Geo-Research Institute 연구원

현재 한국건설기술연구원 지하구조물연구실 선임연구원
(E-mail : jjhcivil@kict.re.kr)