

# 지열개발을 위한 심부굴착

정 재 형  
한국건설기술연구원

## 1. 서론

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 원고에서는 지열활용을 위하여 필수적으로 사용되는 심부 지열정 굴착기법과 경제성, 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.

## 2. 지열발전을 위한 심부 굴착

기존의 화석연료 및 원자력에 의존하여 전기를 생산해오던 방식에서 다양한 형태의 에너지원에서 전기를 생산할 수 있는 사회적, 경제적, 기술적 여건이 마련되고 있다. 여러 가지 대체안 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 수백 m에서 수 km까지 지열정을 굴착하여 활용한다. 이 굴착과정에서 지열발전소 건설에 소요되는 상당부분의 비용이 발생하며, 굴착과정의 성패가 지열발전에 영향을 크게 주게 된다.

### 2.1 굴착심도와 지열발전

지열발전을 열원의 이용형태와 굴착심도로 분류하면 표 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.

<표 1> 지열발전의 형태

이용형태	지열원	추출온도(℃)	굴착심도(m)
천층수 직접이용	천층수, 지표수	30 ~100	~ 200
열수직접이용	열수, 온천수	60~100	~ 2,000
EGS	고온암체	70~300	2,000 ~

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

### 2.2 지열정의 종류

지열발전을 위해서는 지열정을 굴착하여 지열을 추출하는 시스템을 건설하여야 한다. 그림 1은 Enhanced Geothermal System(EGS)의 개요를 보여주고 있으며, 지열정의 종류와 경사굴착의 상황을 잘 알 수 있다.

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

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 mm 정도이고 대형의 경우 220 mm 정도로서 실린더형태의 암석 샘플을 채취하면서 굴착한다.

소형을 사용한 조사는 심도 500 m ~ 1,500 m

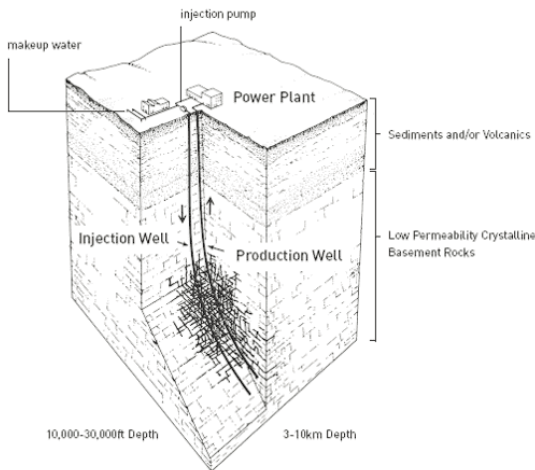
정도로서 조사 범위내에서 1 ~ 2 km<sup>2</sup> 당 1개 정도 굴착하는 것이 일반적이다. 소형 조사정에서 채취한 코어를 분석하여 지표 조사에서 얻을 수 없는 데이터를 획득하여 지표조사와 비교함으로써 보다 정확한 지하 구조를 알 수 있다. 지표에서는 측정할 수 없는 지하의 온도분포를 직접 측정하고, 균열 발달의 정도나 유체의 성질등도 조사할 수 있다.

대형 조사정은 조사를 마친 후 생산정으로 활용하는 것을 염두에 두고 굴착한다. 발전소 건설을 위한 열원까지 직접적으로 굴착한 후에 증기나 열수를 분출시키는 예비실험을 수행하고 발전소를 건설할 수 있을지에 대한 타당성을 최종적으로 조사하는 것이 목적이다. 타당성이 인정되어 발전소 건설이 확정되면, 생산정이나 환원정으로 활용하는 경우도 많다.

생산정(그림 2)은 지하로부터 증기나 열수를 꺼내, 증기를 발전소에 공급하기 위한 우물로서 지

<표 2> 지열발전을 위한 지열정의 종류

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



[그림 1] EGS의 개요 (INL, 2006)



[그림 2] 지열 생산정 (일본)

하에서 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 주변 환경에 대한 지속적인 관측이 필수적이다. 조사정은 폐쇄된 생산정 및 환원정을 활용하는 경우가 많으며, 직경은 매우 다양하다.

### 2.3 공벽보호관

굴착작업 시 굴착정의 공벽붕괴를 방지하고 지층수 및 기타 유체들의 유입을 막고, 생산정과 환원정의 열손실을 방지하기 위하여 공벽보호관을 설치하게 된다.

공벽보호관은 굴착설계에 있어서 핵심적인 사항으로 지역적인 지반의 특성에 좌우되며, 굴착비용의 상당부분을 차지하게 된다. 굴착심도가 깊어지게 되면 지표에서 대구경의 굴착이 이루어져야 하며 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 시추작업 중에 공벽보호관을 설치하는 것은

불가능해진다. 공벽보호관을 유형별로 분류하면 표 3과 같다.

### 2.4 시멘팅 (그라우팅)

시멘팅은 공벽보호관 설치작업과 함께 굴착작업의 중요한 일부이다. 시멘팅이 부적절하게 되면 가스의 누출 등이 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 시멘트 등의 고화제를 화학반응시켜 목표강도와 차수성을 얻는 작업이므로, 지열발전과 같은 고온, 고압의 상황에서 원활한 반응을 얻기 어렵다. 그러므로 지열발전을 위한 시멘트 첨가제의 개발 등이 필요하며, 신개념의 고화제 또한 개발될 필요가 있다.

## 3. 심부 굴착의 경제성

### 3.1 심부 굴착비용의 예측

지열정을 굴착하기 위하여 소요되는 비용은 전체 프로젝트에서 상당히 큰 비중을 차지한다. 예를 들어 EGS보다 낮은 단계의 지열프로젝트에서도 전체 비용의 약60%를 차지하기도 한다. 지열프로젝트에 있어서 굴착비용을 줄이는 것이 전체 프로젝트의 경제성을 좌우하는 경우가 많고 본 프로젝트를 위한 조사 단계에서도 거의 동일한

<표 3> 공벽보호관의 유형 (강주명, 1994)

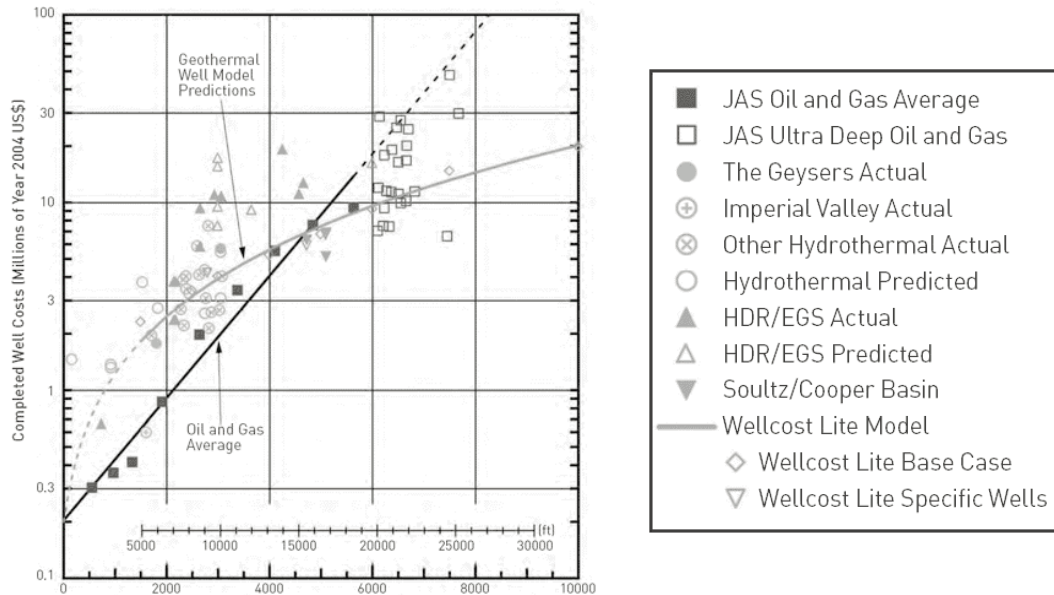
유형	설치심도	목적
전도보호관	수십 m 이내	굴착장비의 기초 보강 및 지표미고결층 보호
지표보호관	수백 m 이내	고결 연질암반의 붕괴방지 및 시추공의 마찰손상 방지
중개보호관		과지압층 또는 팽창성 암반의 처리에 사용
생산정보호관	수 km이내	목표심도에서 생산정을 보호, 라이너를 동시사용하는 것이 일반적
라이너		공벽보호관을 지표까지 연장하지 않고 중간에서 처리하는 보호관

규모의 설비가 요구되는 등의 많은 비용이 필요한 공정이 있다. 이에 대한 연구와 기술개발이 요구됨에도 불구하고 전 세계적으로 심부굴착에 따른 비용 등의 자료가 정리되어 있지 않다. 심부지열자원을 활용하는 프로젝트가 그리 많지 않은 것도 한 가지 이유가 될 것이며, 연구 목적의 프로젝트가 많았다는 것도 이유가 될 수 있다.

지열정 개발에 관한 적은 데이터를 가지고 미국 샌디아 국립연구소에서 EGS 지열정 개발 비용을 사전에 예측하기 위해서 과거 20년간 샌디아 연구소에서 Bill Livesay와 동료에 의해서 개발된 Wellcost Lite 지열정 비용계산 모델이 있다. 이 모델은 우물 직경, 빗트수명, 관입율, 케이싱 디자인, 지질학적 구성 상태 등의 다수 파라미터를 사용하여 1,500 m에서 10,000 m까지의 깊이 범위

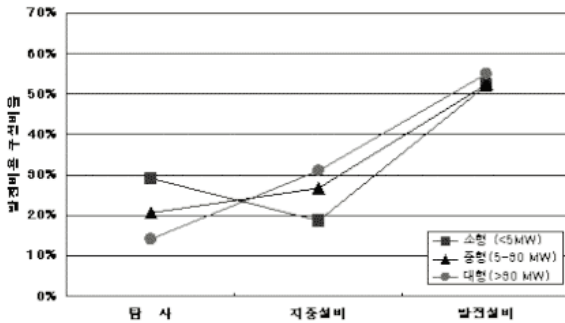
는 3개의 카테고리로 모델화하였다. 천부지열정(1,500 ~ 3,000 m), 중간급지열정(4,000 ~ 5,000 m) 및 심부지열정(6,000 ~ 10,000 m)으로 구분하였다. 지열정에 대한 자료가 부족하여 유정과 가스정을 참고하여 지열정 개발비용을 예측하면 그림 3과 같이 정리될 수 있다. 예측된 자료로 보면, 일반적으로 유정과 가스정보다 큰 직경의 굴착정을 사용하기 때문에 심도 약 5,000 m까지 지열정을 굴착하는 비용이 유정 및 가스정보다 많이 드는 것으로 예측되었다.(Idaho Lab, 2006)

지열발전에 소요되는 비용을 Wellcost Lite 모델로 분석하여 보면 그림 4와 같이 나타낼 수 있으며, 심부굴착부분을 탐사와 지중설비로 구분하여 표시하였다. 탐사의 개념은 상업적 발전 및 계

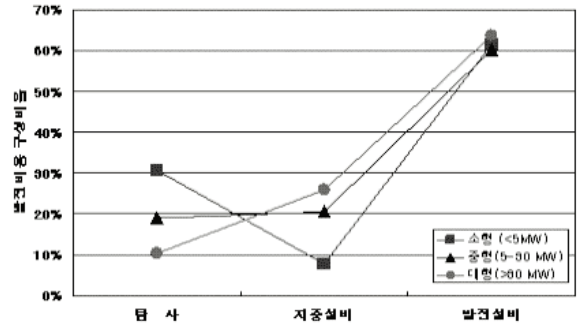


1. JAS = Joint Association Survey on Drilling Costs.
2. Well costs updated to US\$ (yr. 2004) using index made from 3-year moving average for each depth interval listed in JAS (1976-2004) for onshore, completed US oil and gas wells. A 17% inflation rate was assumed for years pre-1976.
3. Ultra deep well data points for depths greater than 6 km are either individual wells or averages from a small number of wells listed in JAS (1994-2000).
4. "Other Hydrothermal Actual" data include some non-US wells [Source: Mansure 2004].

[그림 3] Wellcost lite model에 의한 심도별 따른 굴착비용 비교 (INL, 2006)



(a) 보통수준의 지열자원인 경우



(b) 지열자원이 풍부한 경우

[그림 4] Wellcost lite model에 의한 지열발전 비용분석 (INL, 2006)

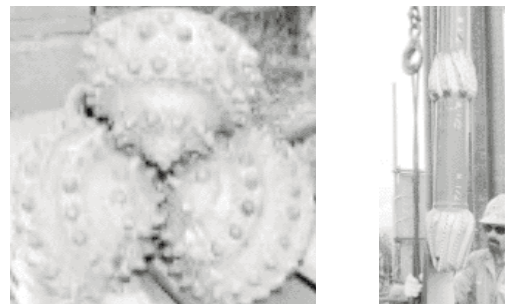
획단계에서 지열자원의 매장량을 추정하는 등의 작업을 포함하고 있으며, 지열발전을 목적으로 하는 경우에는 시험시추 등을 포함한다. 모델에 의한 예측을 보면 지열자원이 풍부한 현장에서 전체 비용 중에서 탐사와 지중설비의 비중이 적은 것을 알 수 있다.

### 3.2 기술개발을 통한 굴착비용 저감

심부굴착비용을 줄이는 것은 심부 지열자원을 적극적으로 활용하는데 필수적인 항목이다. 굴착 비용을 줄이기 위해서는 앞 절에서 언급한 것과 같이 굴착 시 발생하는 불확실성을 제거하고 기존 굴착자료를 체계적으로 정리하는 것이 필요하다. 이와 함께 종래의 굴착기법을 개선 및 개량하여 비용을 절감시키는 노력 또한 매우 중요하며 이런 부분들을 정리하여 보았다.

EGS에서 사용되는 지열정 개발비용은 사용된 케이싱의 수에 큰 영향을 받는다. 예를 들어 4회의 케이싱 간격을 두는 것과 5회의 케이싱 간격을 두는 것을 고려해보면, 경제적으로 케이싱 간격이 길고 천부 케이싱의 직경이 적어서 각종 설비의 규모가 작은 4회의 경우가 이득이 많지만, 공내 안정성(wellbore stability)의 문제를 생각하면 짧은 케이싱의 5회의 경우가 안전하다.

굴착속도를 증진시키기 위한 비트가 포함된 천공 선단부의 개선 및 개량이 필요하다. 신재료의



[그림 5] 심부 지열정 개발을 위한 비트

도입이 기대되며, 비트부의 내구성을 증진시키고, 다양한 지질에 적용될 수 있는 시스템의 개발이 요구된다. 그림 5는 다양한 지질에서 일반적으로 사용되는 비트 중 일부 나타내고 있다.

케이싱을 활용하여 지열정을 굴착하는 기술이 개발된다면 굴착 경비를 대폭 삭감시킬 가능성이 있다. 현재 굴착기술은 별도의 공정으로 케이싱을 설치하고 시멘팅 처리를 하게 되는데 이러한 부분을 하나의 공정으로 단축시 다면 긴 케이싱 간격을 사용할 수 있게 하여 경비 절감을 피할 수 있다. 그리고 시멘팅 부분을 개량하여 시공시간을 절감할 수 있을 것으로 판단된다.

종래의 굴착 설계의 개념을 정립하여 현재 사용되고 있는 심도별로 증가되는 지열정의 크기증가 폭을 줄임으로서 경비를 절감할 수 있다. 이를 위해서는 공내 압력 등의 문제에 대한 연구가 필요하다.



고온 환경에서 작동할 수 있는 장비 및 실링재료를 개발할 필요가 있다. 지열정은 유정과 가스정 굴착에서 보다 높은 온도 환경에서 장비가 운용된다. 고온 환경에서 작업하여야 하기 때문에 선단부를 측정하고, 제어하는데 사용되는 장치와 센서의 개발이 요구된다. 최근까지 전자분야에서는 대략 150℃ 가 한계로 되어있으며, 배터리는 똑같이 영향을 받는다. 현재 지열정 굴착을 경제적으로 하기위해서는 보다 많은 개량이 필요한 실정이다. 비트부에 포함되는 썰, 케이בל 절연 및 밀봉하는 장치는 필수적으로 온도에 대한 영향을 검토하여야 하며 개선이 필요하다.

굴착 중 발생하는 자료의 실시간 분석 및 갱내 검증이 쉽게 수행되는 시스템의 개발이 필요하다. 갱내 검증의 사용은 지열의 산업에 있어서 매우 중요한 모니터링 도구이다. 유정과 가스정 굴착에서와 같이 심부 지열정 굴착에서 로깅 기법이 도입된다면 굴착경비를 상당히 줄일 수 있을 것으로 생각된다.

경사로 지열정을 굴착하는 기술은 지열 프로젝트의 경제성과 효율성을 확보하는 중요한 기술이다. EGS와 같은 지열 발전소는 1개 이상의 생산정이 필요하며, 경사굴착을 사용하지 않을 경우 지상에서 넓은 면적을 점유하게 되어 환경문제 등 입지조건에 관련한 문제를 발생시킬 수 있다. 현재는 심도 900 m 이상의 깊이에서 경사굴착이 가능하며, 기술 및 기법의 개발이 필요한 부분이다.

굴착경험을 체계화하여 비용절감에 활용하는 기법이 필요하다. 일반적으로 지열정의 굴착은 시추 기술자의 경험에 의존하는 부분이 크며, 인근 지역에서 비슷한 심도의 굴착 경험은 전체적인 굴착경비를 줄일 수 있는 요인이 된다. 이러한 부분을 합리적으로 검증하고 경비절감에 연결시킬 수 있는 기법 또는 시스템의 제안이 요구된다.

#### 4. 심부굴착과 환경영향

지열 에너지는 지구의 온도를 활용하는 기술로

서 청정에너지로 보아도 무방할 것이다. 그러나 지열 에너지를 활용하기 위한 시설의 건설, 굴착 작업 또는 플랜트 자체가 유발하는 환경영향은 사전에 주의 깊게 고찰되어야 하는 부분이다. 본 원고에서는 국외사례를 통하여 심부굴착에 따른 환경영향을 정리하였다.

#### 4.1 환경영향

환경영향이란 인간의 활동에 의하여 주변 환경에 미치는 영향을 총칭하는 말로서, 우리나라는 환경영향평가제도를 운영하여 각종 사업에 대한 환경적 판단을 하고 있다. 환경영향평가 시에는 평가항목을 사전에 정하여 평가하고 환경정책평가연구원이 의견을 제시하는 것이 일반적이다. 일정 규모이상의 사업에 대하여 환경영향평가를 실시하지만, 우리나라에서는 지열발전에 대한 구체적인 사업이 없었기 때문에 환경영향평가의 사례는 없다.

일반적으로 지열이용에 따른 환경영향은 지열이용 규모에 비례한다고 알려져 있다(Lunis and Brechenridge, 1991). 표 4는 지열 직접이용 시 우려되는 환경영향의 가능성과 사안의 중대성을 정리하고 있으며, 바이너리 발전 등과 같은 경우

<표 4> 지열이용에 따르는 환경영향 (Lunis and Brechenridge, 1991)

항목	발생 빈도	사안의 중대성	국내발생 가능성*
공기오염	낮음	중간	
지표수오염	중간	중간	
지하수오염	낮음	중간	
지반침하	낮음	낮음-중간	낮음
소음공해	높음	낮음-중간	높음
지열정이 폭발	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 참조

에도 적용 가능할 것으로 판단된다.

우리나라의 경우 국토가 좁으며, 국민들의 환경에 대한 의식이 높기 때문에 미국과 같은 인구저밀도 국가들보다 작은 환경문제에도 사회적 이슈가 되기도 한다. 이러한 관점에서 심부 굴착과정에서의 소음 문제와 문화/역사 유적지 문제는 우리나라에서 발생할 가능성이 크다고 할 수 있다. 특히, 소음관련 문제들은 최근 건설 환경관련 민원의 대다수 건수를 차지하고 있는 실정이다.

### 4.2 심부굴착에 따른 영향

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

#### 1) 지형 훼손

지열 개발을 위해서는 진입도로를 개설한다든지, 지온의 변화 조사를 위한 조사정을 발전플랜트에서 상당히 떨어진 지역에 굴착한다든지 하여 지형을 훼손하는 경우가 발생한다. 굴착심도에 따른 상부의 지형훼손 가능성을 대한 자료로 정리하면 표 5와 같다.

#### 2) 대기 오염

지열 이용 플랜트의 열수나 증기 등의 지열 유체에는 일반적으로, 이산화탄소(CO<sub>2</sub>), 황화수소(H<sub>2</sub>S), 암모니아(NH<sub>3</sub>), 메탄(CH<sub>4</sub>) 등의 가스 성분을 포함하고 있는 경우가 있으며, 온도에 의해서 용해도가 높아지는 염화나트륨(NaCl), 붕소(B), 비소(As), 수은(Hg) 등이 포함되어 공기 중에 배출될 수 있다. 반면, 아이슬란드의 지역난방에 이용되고 있는 지열유체의 경우에는 무공해에

가까운 현장도 있다(Dickson and Fanelli, 2004).

초기의 심부굴착정의 경우에서 대기오염이 문제가 되는 경우가 있었으며, 황화수소 대표적 오염물이라고 할 수 있다. 사람이 악취를 느끼는 농도의 5 ppb부터 라고 알려져 있으며, 그것 보다 높은 농도가 되면 인체에의 영향이 나타난다고 알려져 있다.(Weres, 1984) 그러나 현재는 여러 가지 방법에 의해 황화수소의 배출을 억제하는 것이 가능하다.

#### 3) 수질 오염

심부 지열정 굴착 작업 시 발생하는 배수가 수질 오염의 원인이 될 수 있다. 굴착을 위한 순환수 및 배출 열수가 고농도의 붕소, 불소 화합물, 비소 등을 포함한 경우에는 수질처리를 실시하거나 지하로 환원시키는 등의 처리가 필요하다.

#### 4) 소음공해

심부 지열정 굴착 작업으로 발생하는 소음이 인근 주민에게 소음공해를 유발시키는 경우가 있다. 굴착기에서 발생하는 높은 주파수의 소음이 발생될 가능성이 있으며, 고온의 열수가 순환하면서

<표 4> 지열 발전을 위한 필요 부지 면적(Dickson and Fanelli, 2004)

굴착심도	현장 면적	비고
300 ~ 700 m	300 ~ 500 m <sup>2</sup>	
2000 m	1200 ~ 1500 m <sup>2</sup>	



[그림 6] 굴착을 위한 방음하우스 설치(일본)

소음을 발생할 수도 있다(Brown, 2000). 일반적으로 이러한 소음은 환경 기준치를 넘지 않는다고 알려져 있으나, 그림 6과 같이 굴착작업을 위하여 방음 하우스 등을 사용하고 있는 해외 사례도 있다. 소음공해는 소음원과 민원인의 위치관계에 많이 의존하게 되며, 우리나라와 같이 사업장과 민가가 인접해 있는 경우는 사업장에서 대단한 주의를 하여야 할 필요가 있다.

**5. 결 론**

지열을 이용한 발전에 대한 관심이 증대하고 있는 상황에서 국내에서 기초단계인 심부굴착에 대하여 국외자료 등을 활용하여 요소기술, 경제성 및 환경영향에 대하여 조사하였다. 지열정 굴착기술에 대하여는 공벽유지공 및 시멘팅 기술 등에 대한 개발이 필요할 것으로 판단되었으며, 지열발전에 따른 환경영향에 대해서는 소음 공해 분야가 좁은 국토와 높은 인구밀도의 우리나라에서는 중요하게 다루어 질 부분으로 판단되었다.

**알 림**

본 원고는 “신재생 에너지” 2007년 12월호에 게재된 “지열정 굴착기법과 환경영향”을 중심으로 침삭되어 작성되었음.

**참고문헌**

1. 강주명, 1991, 석유시추공학, 서울대학교 출판부, 279 - 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. Dickson, M. H. and Fanelli, M., 2004, What is geothermal energy?, <http://www.geothermal-energy.org/>.
4. 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, 437-445.
5. Idaho National Lab. (INL), Renewable Energy and Power Department , 2006, “The Future of Geothermal Energy”
6. WERES, O., 1984. Environmental protection and the chemistry of geothermal fluids. Lawrence Berkeley Laboratory, Calif. ,LBL 14403, 44p.